



Estudo numérico da fratura em modo misto de juntas adesivas pelo ensaio Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam

FILIPPE ANDRÉ ALMEIDA NUNES

novembro de 2017

ESTUDO NUMÉRICO DA FRATURA EM MODO MISTO DE JUNTAS ADESIVAS PELO ENSAIO *ASYMMETRIC TAPERED DOUBLE-CANTILEVER BEAM*

Filipe André Almeida Nunes

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO NUMÉRICO DA FRATURA EM MODO MISTO DE JUNTAS ADESIVAS PELO ENSAIO *ASYMMETRIC TAPERED DOUBLE-CANTILEVER BEAM*

Filipe André Almeida Nunes

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Filipe José Palhares Chaves

Professor Adjunto, IPCA

AGRADECIMENTOS

Ao Sr. Engenheiro Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, por ter aceite ser o orientador científico deste trabalho, pela sua dedicação, disponibilidade e apoio ao longo de todo o trabalho.

À minha família e à minha namorada por todo o apoio e incentivo demonstrado.

PALAVRAS CHAVE

Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam, ligação adesiva, mecânica da fratura, tenacidade à fratura, envelope de fratura, modelo de dano coesivo, método de elementos finitos.

RESUMO

Nos últimos anos a utilização de adesivos em aplicações estruturais tem vindo a aumentar bastante, pelo que as ligações adesivas têm substituído os métodos tradicionais de ligação como as ligações aparafusadas, por rebites, soldadura e brasagem. Isto deve-se às muitas vantagens que a utilização de ligações adesivas concede, como permitirem a construção de estruturas mais leves, mais resistentes à fadiga, com menores concentrações de tensões, possibilitarem a ligação de diferentes materiais e concederem um aspeto agradável à ligação. Com a cada vez maior utilização das ligações adesivas em aplicações estruturais torna-se importante conhecer as propriedades mecânicas dos adesivos, e para isso foram desenvolvidos e normalizados vários ensaios que testam adesivos em estado maciço ou aplicado numa junta. Para possibilitar a expansão deste tipo de ligação é importante conseguir prever a resistência da ligação adesiva. Com esta finalidade foram desenvolvidos vários ensaios de caracterização à fratura nos vários modos de fratura, que se baseiam nos conceitos da mecânica da fratura linear elástica para determinar a taxa de libertação de energia de deformação.

Neste trabalho é estudado o ensaio *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam* (ATDCB). Foram efetuados ensaios experimentais com três adesivos com diferente ductilidade, o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e o adesivo SikaForce® 7752. São apresentados os resultados na forma de curvas $P-\delta$ e curvas R para cada provete testado e contruídos os envelopes de fratura de cada adesivo, o que permitiu determinar o critério de propagação em modo misto a aplicar nas simulações numéricas. Foi também escolhida a lei coesiva mais adequada para descrever o comportamento dos adesivos e foram realizados ensaios numéricos com estas condições. É apresentada a comparação dos resultados numéricos com os experimentais e analisados de forma a averiguar a validade da lei de dano coesivo e o critério de propagação em modo misto aplicados. É também realizado um estudo numérico da sensibilidade de cada adesivo à variação dos parâmetros G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 . Com este trabalho, determinou-se o critério de propagação em modo misto mais adequado para os três adesivos e foi efetuada a respetiva validação numérica.

KEYWORDS

Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam, adhesive joints, fracture mechanics fracture toughness, fracture envelope, Finite Element Method, cohesive zone models.

ABSTRACT

In recent years, the use of adhesives in structural applications has been increasing considerably, such that adhesive bonding has replaced traditional bonding methods such as bolted, riveted, welded and brazed joints. This is due to the many advantages of adhesive joints, such as allowing the construction of lighter structures, more resistance to fatigue, lower stress concentrations, possibility to join different materials and nice aesthetics. With the increasing use of adhesive joints in structural applications it is important to know the mechanical properties of adhesives, and for this a number of tests have been developed and standardized that test adhesives as a bulk or applied in a joint. In order to enable the expansion of this type of joint it is important to be able to predict the strength of adhesive joints. For this purpose, several fracture characterization tests were developed in the various fracture modes, which are based on the concepts of linear elastic fracture mechanics to determine the rate of strain energy release.

In this work, the Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam (ATDCB) test is studied. Experimental tests were performed with three adhesives with different ductility, the Araldite® AV138, the Araldite® 2015 and the SikaForce® 7752. Results are presented in the form of P - δ curves and R -curves for each test specimen and the fracture envelopes of each adhesive were built, which allowed to determine the propagation criterion in mixed mode to be applied in the numerical simulations. The most suitable cohesive law was also chosen to describe the behaviour of the adhesives and numerical tests were performed with these conditions. The comparison between the numerical and experimental results is presented and analysed in order to verify the validity of the cohesive damage law and the applied mixed mode propagation criterion. A numerical study of the sensitivity of each adhesive to the variation of the G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 and t_s^0 parameters is also performed. With this work, the more suitable propagation criterion in mixed mode was determined for the three adhesives and the respective numerical validation was made.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	2 Dimensões
3D	3 Dimensões
4ENF	<i>Four-Point End-Notched Flexure</i>
ADCB	<i>Asymmetric Double-Cantilever Beam</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATDCB	<i>Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam</i>
CBBM	<i>Compliance-Based Beam Method</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CLS	<i>Cracked-Lap Shear</i>
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
EN	<i>European Normalization</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
FPZ	<i>Fracture Process Zone</i>
FRMM	<i>Fixed Rate Mixed Mode</i>

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Standard Organization</i>
KM	<i>Kringin Metamodel</i>
MDC	Modelo de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
SLB	<i>Single-Leg Bending</i>
TAST	<i>Thick Adherent Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
UV	UltraVioleta

Lista de Símbolos

a	Comprimento de fenda
a_0	Comprimento de pré-fenda
a_1	Comprimento entre o ponto de carregamento e o zero da escala
a_2	Comprimento entre o zero da escala e a extremidade da fenda
a_{eq}	Comprimento de fenda equivalente
B	Largura do aderente
C	Flexibilidade do aderente
c	Relação entre cargas no ensaio MMB
d	Metade da espessura do aderente
E	Módulo de Young

E_1	Módulo de Young do aderente na direção longitudinal
E_2	Módulo de Young do aderente na direção transversal
E_f	Módulo de flexão corrigido
G	Taxa de libertação de energia de deformação
G_{12}	Módulo de corte no plano
G_{13}	Módulo de corte transversal
G_c	Taxa de libertação de energia de deformação crítica
G_I	Taxa de libertação de energia de deformação em modo I
G_{IC}	Taxa de libertação de energia de deformação crítica em modo I
G_{II}	Taxa de libertação de energia de deformação em modo II
G_{IIC}	Taxa de libertação de energia de deformação crítica em modo II
G_n	Taxa de libertação de energia de deformação no início da propagação da fenda
h	Altura do aderente
$h(a)$	Altura do aderente em função do comprimento de fenda
I	Momento de inércia
J	Módulo de torção
K_{COHE}	Matriz que relaciona as tensões e deformação em tração e corte nos elementos coesivos
L	Comprimento do aderente
M	Momento fletor
m	Fator de geometria para provetes TDCB (declive)
P	Carga

P_u	Carga aplicada por unidade de largura dos aderentes
r_0	Raio externo
T	Momento imposto
t_A	Espessura do adesivo
t_n	Tensão de tração
t_n^0	Tensão máxima à tração
t_p	Espessura dos aderentes
t_s^0	Tensão máxima ao corte
U	Energia de deformação
u	Deformação
V	Carga transversal
W	Densidade de energia de deformação
y_f	Deformação de rotura ao corte
z	Cota no sentido z
Δ	Fator de correção do comprimento de fenda
δ	Deslocamento
δ_n	Deslocamento dos aderentes no início da propagação da fenda
δ_n^0	Deslocamento de carga máxima à tração
δ_{nc}	Deslocamento dos aderentes
δ_s	Deslocamento em corte
δ_s^0	Deslocamento de carga máxima ao corte
ε_f	Deformação de rotura

θ	Rácio de modo misto
θ_0	Rotação dos aderentes na ponta da fenda
θ_p	Rotação relativa dos aderentes no ponto de solicitação P
σ_f	Tensão de rotura
σ_y	Tensão de cedência
τ	Tensão de corte
τ_f	Tensão de rotura de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte
ψ	Vetor de tração na área que circunda a frente da fenda

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONSTITUINTES E REGIÕES DE UMA LIGAÇÃO ADESIVA [2]	6
FIGURA 2 - INFLUÊNCIA DAS VARIADAS CIÊNCIAS NO PROJETO DE UMA JUNTA ADESIVA [1]	6
FIGURA 3 - PRINCIPAIS USOS DE ADESIVOS E SELANTES (A) PRODUTOS (B) MERCADO FINAL [1]	9
FIGURA 4 – USO DE LIGAÇÕES ADESIVAS NO AVIÃO SAAB 340, FUSELAGEM, ASAS E CAUDA [2]	10
FIGURA 5 – AUMENTO DO USO DE ADESIVOS NA CONSTRUÇÃO DO AVIÃO BOEING [4]	10
FIGURA 6 – MELHORIA DA RIGIDEZ (ESQUERDA) E DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES (DIREITA) DE UMA JUNTA ADESIVA EM RELAÇÃO A UMA JUNTA APARAFUSADA [2]	11
FIGURA 7 - UTILIZAÇÃO DE ADESIVOS NA CONSTRUÇÃO DE UM AUTOMÓVEL [5]	12
FIGURA 8 - VIDRAGEM DIRETA [5]	12
FIGURA 9 - EXEMPLOS DE PONTOS DO AUTOMÓVEL ONDE SÃO APLICADOS ADESIVOS [5]	13
FIGURA 10 - LOCAIS DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE REFORÇO ESTRUTURAL [5]	13
FIGURA 11 - LOCAIS DA PORTA ONDE SE APLICAM ADESIVOS COM VISTA A AMORTECER O RUÍDO [5] ..	14
FIGURA 12 - APLICAÇÕES DE ADESIVOS NA CONSTRUÇÃO DE UM COMBOIO [6]	14
FIGURA 13 - USO DE ADESIVOS NA VIDRAGEM DIRETA [6]	15
FIGURA 14 - USO DE ADESIVOS NA LIGAÇÃO DE COMPONENTES EXTERIORES DE COMBOIOS [6]	15
FIGURA 15 - USO DE ADESIVOS NA LIGAÇÃO DE COMPONENTES INTERIORES DE COMBOIOS [6]	15
FIGURA 16 - UTILIZAÇÃO DE ADESIVOS NA COLAGEM DO PISO EM COMBOIOS [6]	15
FIGURA 17 - TIPOS DE ESFORÇOS EM JUNTAS ADESIVAS (A) TRAÇÃO (B) COMPRESSÃO (C) CORTE (D) CLIVAGEM (E) ARRANCAMENTO [1]	16
FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NUMA JUNTA TOPO A TOPO SOB AXIAL E NÃO-AXIAL ESFORÇO [1]	16
FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE UM ADESIVO SOB TENSÕES DE CORTE [1]	17
FIGURA 20 - COMPARAÇÃO DO EFEITO DA LARGURA E DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO NA RESISTÊNCIA DA JUNTA AO CORTE [17]	18
FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NUMA JUNTA SOB CARGAS DE CLIVAGEM [1]	18
FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE ARRANCAMENTO E DE CLIVAGEM [17]	19
FIGURA 23 - TIPOS DE ROTURA [17]	19
FIGURA 24 - TIPOS DE JUNTA TOPO A TOPO [1]	21

FIGURA 25 - DISTORÇÃO CAUSADA POR CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES [34].....	22
FIGURA 26 - JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES E CONFIGURAÇÕES MELHORADAS [1].....	22
FIGURA 27 - CONFIGURAÇÃO DE COBRE JUNTA E FORMAS MELHORADAS [1]	23
FIGURA 28 - VÁRIAS CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS TUBULARES [1].....	23
FIGURA 29 - ESQUEMA DE PRODUÇÃO DE UM PROVETE MACIÇO POR INJEÇÃO [37].....	28
FIGURA 30 - ESQUEMA DE PRODUÇÃO DE UM PROVETE MACIÇO POR PRESSÃO ENTRE PLACAS [37]	29
FIGURA 31 - GEOMETRIA E DIMENSÕES DOS PROVETES MACIÇOS PARA TESTE À TRAÇÃO SEGUNDO A NORMA EN ISO 527:2 A) PROVETE LONGO E B) PROVETE CURTO [23].....	29
FIGURA 32 - TÍPICA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE UM ADESIVO [23]	30
FIGURA 33 – ENSAIO IOSIPESCU E GEOMETRIA DO PROVETE USADO [23]	31
FIGURA 34 - GEOMETRIA E DIMENSÕES (EM MM) DE UM PROVETE USADO NO TESTE ARCAN [34]	31
FIGURA 35 - FIXAÇÃO DO PROVETE NO TESTE ARCAN [23]	32
FIGURA 36 - ZONA CRÍTICA DE UM PROVETE USADO NO TESTE ARCAN [23]	32
FIGURA 37 - APARELHO TÍPICO DO ENSAIO À TRAÇÃO TOPO-A-TOPO [2]	33
FIGURA 38 - GEOMETRIA DE UM ENSAIO NAPKIN-RING [34]	34
FIGURA 39 - GEOMETRIA DE UM PROVETE USADO NO ENSAIO TAST SOB A NORMA ISO 110033-2 [2]...35	
FIGURA 40 - ESQUEMA DE MONTAGEM DE UM APARELHO TAST COM UM CONJUNTO DE PINOS [2]35	
FIGURA 41 - DIMENSÕES DOS PROVETES USADOS NUM ENSAIO DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES SEGUNDO A NORMA ASTM D 1002 [2].....	36
FIGURA 42 - A) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO DE CORTE E B) DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE ARRANCAMENTO EM JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [2]	36
FIGURA 43 – PROVETE PARA TESTE DE ARRANCAMENTO EM T [2].....	37
FIGURA 44 - MODOS DE FRATURA [44].....	38
FIGURA 45 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DO PROVETE DCB [47]	39
FIGURA 46 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO TÍPICA DO ENSAIO DCB [23]	39
FIGURA 47 - GEOMETRIA PROVETE TDCB [23]	40
FIGURA 48 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DO PROVETE ENF [23]	41
FIGURA 49 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DO PROVETE ELS [23]	41
FIGURA 50 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DO PROVETE 4ENF [23]	42
FIGURA 51 - CONFIGURAÇÃO DO TESTE MMB [23]	43
FIGURA 52 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DO PROVETE ADCB [49].....	44

FIGURA 53 - ESPECTRO DE RÁCIO DE MODO MISTO ATINGIDO COM PROVETES ADCB [50]	44
FIGURA 54 – GEOMETRIA DO PROVETE ATDCB [52]	45
FIGURA 55 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DO PROVETE SLB [44]	45
FIGURA 56 - ESQUEMA DO TESTE FRMM [23]	46
FIGURA 57- ESQUEMA DO ENSAIO CLS [23]	46
FIGURA 58 – ROTAÇÃO E DEFLEXÃO DURANTE O ENSAIO DCB [56]	48
FIGURA 59 – MÉTODO PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE CORREÇÃO DO COMPRIMENTO DE FENDA [52]	49
FIGURA 60 – ILUSTRAÇÃO DA ZONA FPZ E CONCEITO DE FENDA EQUIVALENTE [54]	49
FIGURA 61 – DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ANÁLISE DO ENSAIO DCB [57]	51
FIGURA 62 – SISTEMA EQUIVALENTE PARA ANÁLISE DO ENSAIO ATDCB [52]	52
FIGURA 63 - ELEMENTOS COESIVOS PARA SIMULAR TRAJETOS DE FRATURA EM CAMADAS DE ESPESSURA ZERO, APROXIMAÇÃO LOCAL [64]	54
FIGURA 64 - MODELAÇÃO DE UMA FINA LIGAÇÃO ADESIVA ENTRE ADERENTES, APROXIMAÇÃO CONTÍNUA [69]	55
FIGURA 65 - DIFERENTES FORMATOS DE LEIS DE DANO COESIVO: A) TRIANGULAR OU EXPONENCIAL B) TRAPEZOIDAL [61]	55
FIGURA 66 - FORMA DEFORMADA DO PROVETE DURANTE A PROPAGAÇÃO DA FENDA, COM CONDIÇÕES FRONTEIRA E DE CARREGAMENTO [86]	58
FIGURA 67 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS P- Δ EXPERIMENTAL E MEF DE UM PROVETE TESTADO [86] ...	58
FIGURA 68 – LEI DE DANO COESIVA DE CORTE MÉDIA E DESVIO APÓS APLICAÇÃO DO MÉTODO INVERSO A CINCO PROVETES [86]	59
FIGURA 69 - EXTRAPOLAÇÃO LINEAR DE G_{IC} E G_{IIC} DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE MODO MISTO [79]	60
FIGURA 70 – ERRO DEFINIDO PELA TÉCNICA KM, POR COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS EXPERIMENTAIS E DA ANÁLISE MEF [79]	60
FIGURA 71 - CURVAS P- Δ DE PROVETES SLB COM RÁCIOS DE MODO MISTO VARIÁVEIS, ESPESSURA DO ADERENTE: A) 1,28 MM B) 1,48 MM [79]	61
FIGURA 72 – COMPARAÇÃO ENTRE PREVISÕES NUMÉRICAS (A) E OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS (B) DE UM PROVETE EM T ASSIMÉTRICO [89]	62
FIGURA 73 - RESISTÊNCIA DE JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO OBTIDA EXPERIMENTAL E NUMERICAMENTE EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO [92]	63
FIGURA 74 – SEQUÊNCIA DE DEFORMAÇÃO E CRESCIMENTO DE FENDA NUMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO ASSIMÉTRICA [92]	63

FIGURA 75 – COLOCAÇÃO DOS ELEMENTOS COESIVOS COM DIFERENTES LEIS DE DANO COESIVO NOS MODELOS DE MEF [93]	64
FIGURA 76 – MODO DE FRATURA B PARA ÂNGULO DE 3°: A) SUPERFÍCIES DE FRATURA EXPERIMENTAIS E B) PREVISÃO NUMÉRICA [93].....	65
FIGURA 77 - RESISTÊNCIA EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DAS REPARAÇÕES EM FUNÇÃO DO ÂNGULO [93]	65
FIGURA 78 -REPAROS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES COM COMBINAÇÃO DE CHANFRO DE 45° COM APLICAÇÃO DE CHANFRO NO INTERIOR E EXTERIOR DOS ADERENTES [94].....	66
FIGURA 79 – CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DAS REPARAÇÕES: A) ADERENTES RIJOS B) ADERENTES FLEXÍVEIS. MESMO VALOR DE CARGA [94]	67
FIGURA 80 - CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARLDITE® AV138 [96].....	72
FIGURA 81 - CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARLDITE® 2015 [96]	74
FIGURA 82 - CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DE SIKAFORCE® 7752 [98].....	75
FIGURA 83 - GEOMETRIA E DIMENSÕES DOS PROVETES ATDCB USADOS NOS ENSAIOS	76
FIGURA 84 - RESÍDUOS DE COLA NOS ESPAÇADORES	77
FIGURA 85 - REMOÇÃO DOS RESÍDUOS DE COLA E LIMPEZA DOS ESPAÇADORES E LÂMINAS.....	78
FIGURA 86 - AQUECIMENTO DOS ESPAÇADORES NUM FORNO ELÉTRICO	78
FIGURA 87 – DESMOLDANTE LOCTITE® 770-NC.....	79
FIGURA 88 - POSICIONAMENTO DOS ESPAÇADORES/LÂMINAS NOS SUBSTRATOS	80
FIGURA 89 - APLICAÇÃO DO ADESIVO ARLDITE® 2015	81
FIGURA 90 - COLOCAÇÃO DE PESOS SOBRE OS PROVETES PARA EVITAR DESALINHAMENTOS	81
FIGURA 91 - REMOÇÃO DOS EXCESSOS DE ADESIVO	82
FIGURA 92 - PROVETES COM O CORRETOR APLICADO	82
FIGURA 93 - PROVETE PRONTO COM A ESCALA MÉTRICA COLOCADA.....	83
FIGURA 94 - FIXAÇÃO DO PROVETE NA MÁQUINA DE ENSAIOS.....	84
FIGURA 95 - CAMARA FOTOGRÁFICA UTILIZADA E SEU POSICIONAMENTO	85
FIGURA 96 – CURVAS P- Δ DO ADESIVO ARLDITE® AV138.....	88
FIGURA 97 – CURVAS-R DO PROVETE 6 DO ADESIVO ARLDITE® AV138	89
FIGURA 98 - CURVAS-R DO PROVETE 7 DO ADESIVO ARLDITE® AV138	90
FIGURA 99 – ENVELOPE DE FRATURA EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARLDITE® AV138	91
FIGURA 100 – CURVAS P- Δ DO ADESIVO ARLDITE® 2015	92

FIGURA 101 - CURVAS-R DO PROVETE 2 DO ADESIVO ARALDITE® 2015	93
FIGURA 102 - CURVAS-R DO PROVETE 5 DO ADESIVO ARALDITE® 2015	93
FIGURA 103 – ENVELOPE DE FRATURA EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	94
FIGURA 104 - CURVAS P- Δ DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	95
FIGURA 105 – ZONA ONDE OCORREU FALTA DE PREENCHIMENTO NO PROVETE 4 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	96
FIGURA 106 - CURVAS-R DO PROVETE 1 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	97
FIGURA 107 - CURVAS-R DO PROVETE 6 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	98
FIGURA 108 – ENVELOPE DE FRATURA EXPERIMENTAL DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	99
FIGURA 109 - REFINAMENTO GERAL DA MALHA DO PROVETE SIMULADO.....	101
FIGURA 110 – DETALHE DO MAIOR REFINAMENTO DO ADESIVO E ZONA CIRCUNDANTE EM COMPARAÇÃO À ZONA DE PRÉ-FENDA	101
FIGURA 111 - DETALHE DA MALHA NÃO ESTRUTURADA NA ZONA INCLINADA DO ADERENTE TDCB	102
FIGURA 112 – CONDIÇÕES FRONTEIRA APLICADAS AOS MODELOS ATDCB	102
FIGURA 113 - LEI COESIVA TRIANGULAR DO MDC IMPLEMENTADO NO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO ABAQUS®	103
FIGURA 114 - CURVAS P- Δ DO PROVETE 3 REGISTADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO ARALDITE® AV138.....	106
FIGURA 115 - CURVAS P- Δ DO PROVETE 6 REGISTADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO ARALDITE® AV138.....	106
FIGURA 116 - CURVAS-R DO PROVETE 3 REGISTADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO ARALDITE® AV138.....	108
FIGURA 117 - CURVAS-R DO PROVETE 6 REGISTADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO ARALDITE® AV138.....	108
FIGURA 118 - CURVAS P- Δ DO PROVETE 1 REGISTADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO ARALDITE® 2015	110
FIGURA 119 – CURVAS P- Δ DO PROVETE 2 REGISTADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO ARALDITE® 2015	110
FIGURA 120 – CURVAS-R DO PROVETE 1 REGISTADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO ARALDITE® 2015	112
FIGURA 121 - CURVAS-R DO PROVETE 2 REGISTADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO ARALDITE® 2015	112

FIGURA 122 - CURVAS P- Δ DO PROVETE 5 REGISTRADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752	114
FIGURA 123 - CURVAS P- Δ DO PROVETE 6 REGISTRADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752	114
FIGURA 124 - CURVAS-R DO PROVETE 5 REGISTRADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752	116
FIGURA 125 - CURVAS-R DO PROVETE 6 REGISTRADAS NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752	116
FIGURA 126 - ENVELOPE DE FRATURA NUMÉRICO DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	117
FIGURA 127 – ENVELOPE DE FRATURA NUMÉRICO DO ADESIVO ARALDITE® 2015	118
FIGURA 128 – ENVELOPE DE FRATURA NUMÉRICO DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	119
FIGURA 129 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® AV138 AO PARÂMETRO G_{IC}	120
FIGURA 130 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® AV138 AO PARÂMETRO G_{IIC}	120
FIGURA 131 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® AV138 AOS PARÂMETROS G_{IC} E G_{IIC} COMBINADOS	121
FIGURA 132 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® AV138 AO PARÂMETRO T_N^0	121
FIGURA 133 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® AV138 AO PARÂMETRO T_S^0	122
FIGURA 134 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® AV138 AOS PARÂMETROS T_N^0 E T_S^0 COMBINADOS	122
FIGURA 135 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® 2015 AO PARÂMETRO G_{IC}	123
FIGURA 136 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® 2015 AO PARÂMETRO G_{IIC}	123
FIGURA 137 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® 2015 AOS PARÂMETROS G_{IC} E G_{IIC} COMBINADOS	124
FIGURA 138 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® 2015 AO PARÂMETRO T_N^0	125
FIGURA 139 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® 2015 AO PARÂMETRO T_S^0	125
FIGURA 140 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO ARALDITE® 2015 AOS PARÂMETROS T_N^0 E T_S^0 COMBINADOS	126
FIGURA 141 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 AO PARÂMETRO G_{IC}	126
FIGURA 142 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 AO PARÂMETRO G_{IIC}	127
FIGURA 143 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 AOS PARÂMETROS G_{IC} E G_{IIC} COMBINADOS	127
FIGURA 144 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 AO PARÂMETRO T_N^0	128

FIGURA 145 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 AO PARÂMETRO T_S^0	128
FIGURA 146 - SENSIBILIDADE DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 AOS PARÂMETROS T_N^0 E T_S^0 COMBINADOS	129

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS A TER EM ATENÇÃO NO PROJETO DE UMA JUNTA ADESIVA [3]	7
TABELA 2 - APLICAÇÕES DE ADESIVOS NOS COMBOIOS [6]	15
TABELA 3 - RELAÇÃO ENTRE TIPO DE ROTURA E DIFERENÇA DE RESISTÊNCIA DOS DIFERENTES CONSTITUINTES DA JUNTA [1]	20
TABELA 4 - TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS ADESIVOS ESTRUTURAIS [3]	27
TABELA 5 - TESTES DE MODO MISTO E RESPECTIVO RÁCIO DE MODO MISTO [48]	42
TABELA 6 - PROPRIEDADES DO AÇO C45E	71
TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [97]	73
TABELA 8 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [95]	74
TABELA 9 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [98]	76
TABELA 10 - VELOCIDADE DE ENSAIO DE CADA ADESIVO	86
TABELA 11 – COMPRIMENTO INICIAL E DE PRÉ-FENDA DE CADA ENSAIO (MM)	86
TABELA 12 – PARÂMETROS USADOS NOS CRITÉRIOS DE MODO MISTO	87
TABELA 13 – VALORES DE G_{IC} E G_{IIC} CARACTERÍSTICOS DE CADA ADESIVO ANALISADO	87
TABELA 14 – VALORES DE FORÇA MÁXIMA DE DESLOCAMENTO DE ROTURA REGISTRADOS NOS ENSAIOS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138	89
TABELA 15 – VALORES DE G , G_I E G_{II} DOS ENSAIOS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138	90
TABELA 16 - VALORES DE FORÇA MÁXIMA E DE DESLOCAMENTO DE ROTURA REGISTRADOS NOS ENSAIOS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015	92
TABELA 17 – VALORES DE G , G_I E G_{II} DOS ENSAIOS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015	94
TABELA 18– VALORES DE FORÇA MÁXIMA E DE DESLOCAMENTO DE ROTURA REGISTRADOS NOS ENSAIOS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	96
TABELA 19 – VALORES DE G , G_I E G_{II} DOS ENSAIOS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	98
TABELA 20 – MÉDIA DA FORÇA MÁXIMA E DESLOCAMENTO DE ROTURA DE CADA ADESIVO	100
TABELA 21 – MÉDIA DOS VALORES DE G REGISTRADA EM CADA ADESIVO	100
TABELA 22 - VALORES DE FORÇA MÁXIMA E DESLOCAMENTO DE ROTURA DO ADESIVO ARALDITE® AV138 REGISTRADOS NUMERICAMENTE E VARIAÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESPECTIVOS VALORES REGISTRADOS EXPERIMENTALMENTE	105

TABELA 23 - VALORES DE G , G_I E G_{II} DO ADESIVO ARALDITE® 2015 REGISTRADOS NUMERICAMENTE E VARIAÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESPETIVOS VALORES EXPERIMENTAIS	107
TABELA 24 - VALORES DE FORÇA MÁXIMA E DESLOCAMENTO DE ROTURA DO ADESIVO ARALDITE® 2015 REGISTRADOS NUMERICAMENTE E VARIAÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESPETIVOS VALORES REGISTRADOS EXPERIMENTALMENTE.....	109
TABELA 25 - VALORES DE G , G_I E G_{II} DO ADESIVO ARALDITE® 2015 REGISTRADOS NUMERICAMENTE E VARIAÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESPETIVOS VALORES REGISTRADOS EXPERIMENTALMENTE	111
TABELA 26 – VALORES DE FORÇA MÁXIMA E DE DESLOCAMENTO DE ROTURA DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 REGISTRADOS NUMERICAMENTE E VARIAÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESPETIVOS VALORES REGISTRADOS EXPERIMENTALMENTE	113
TABELA 27 - VALORES DE G , G_I E G_{II} DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 REGISTRADOS NUMERICAMENTE E VARIAÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESPETIVOS VALORES REGISTRADOS EXPERIMENTALMENTE	115

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Ligações adesivas.....	5
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	8
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	9
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	16
2.1.4	Configurações possíveis de junta	20
2.1.5	Adesivos estruturais	24
2.2	Determinação das propriedades dos adesivos	28
2.2.1	Ensaio de adesivo maciço	28
2.2.2	Ensaio de tração em provetes de adesivo maciço.....	29
2.2.3	Ensaio de adesivo em junta	32
2.3	Ensaio de caracterização à fratura	37
2.3.1	Modo I	38
2.3.2	Modo II	40
2.3.3	Modo misto I + II	42
2.4	Métodos de determinação da tenacidade à fratura.....	46
2.4.1	Ensaio Double-Cantilever Beam	47
2.4.2	Ensaio Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam.....	52
2.5	Modelos de dano coesivo	53

2.5.1	Leis de dano coesivo.....	54
2.5.2	Métodos de determinação dos parâmetros coesivos	56
2.5.3	Modelação numérica de juntas adesivas por modelos de dano coesivo	57
2.5.3.1	Ensaio de fratura em modo puro	57
2.5.3.2	Ensaio de fratura em modo misto.....	59
2.5.3.3	Juntas usadas em aplicações reais de modo misto.....	61
3	DESENVOLVIMENTO.....	71
3.1	Trabalho experimental	71
3.1.1	Materiais utilizados	71
3.1.1.1	Substratos	71
3.1.1.2	Adesivos.....	72
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	72
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	73
3.1.1.2.3	SikaForce® 7752	75
3.1.2	Geometria das juntas	76
3.1.3	Processo de fabrico	77
3.1.4	Ensaio das juntas	83
3.1.5	Resultados obtidos	86
3.1.5.1	Araldite® AV138.....	88
3.1.5.2	Araldite® 2015	91
3.1.5.3	SikaForce® 7752.....	95
3.1.5.4	Análise dos resultados obtidos	99
3.2	Trabalho numérico	100
3.2.1	Condições da análise numérica	101
3.2.2	Modelos de dano coesivo.....	102
3.2.2.1	Modelo de dano coesivo triangular	102
3.2.3	Validação das leis coesivas	104
3.2.3.1	Araldite® AV138.....	104
3.2.3.2	Araldite® 2015	108

3.2.3.3	SikaForce® 7752	112
3.2.4	Validação dos critérios de propagação	116
3.2.4.1	Araldite® AV138	117
3.2.4.2	Araldite® 2015	117
3.2.4.3	SikaForce® 7752	118
3.2.5	Análise de sensibilidade às leis coesivas obtidas	119
3.2.5.1	Araldite® AV138	119
3.2.5.2	Araldite® 2015	123
3.2.5.3	SikaForce® 7752	126
4	CONCLUSÕES	133
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	137

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Hoje em dia as ligações adesivas são usadas numa grande variedade de aplicações estruturais. Portanto, é muito importante conhecer e poder prever a resistência de uma ligação adesiva a uma eventual rotura, para isso é importante caracterizar as ligações adesivas à fratura. Como na realidade as juntas adesivas necessitam de resistir ao modo de carga de determinadas aplicações, estas podem estar sujeitas a tensões de tração (modo I), de corte (modo II) ou, como na maioria das situações reais, estar sujeitas a ambas (modo misto). Portanto, é muito importante poder caracterizar as ligações adesivas à fratura em modo misto. Para isso foram desenvolvidos vários ensaios baseados na mecânica da fratura. Estes ensaios são normalmente destrutivos e bastante morosos, por isso é muito importante utilizar *softwares* que sejam capazes de simular com exatidão esses ensaios e assim reduzir os custos e o tempo necessários para efetuar esses ensaios. Existem técnicas de previsão que, associadas a uma análise por elementos finitos, permitem prever o comportamento das ligações adesivas, como por exemplo os modelos de dano coesivo. Neste caso, para que a análise numérica consiga descrever corretamente o comportamento da ligação adesiva, é de extrema importância aplicar os critérios de propagação em modo misto mais adequados a cada adesivo nos modelos de dano coesivo. As análises numéricas também estão dependentes de parâmetros como a taxa de libertação de energia de deformação crítica em modo I, G_{IC} , a taxa de libertação de energia de deformação crítica em modo II, G_{IIC} , a tensão máxima à tração, t_n^0 , e a tensão máxima ao corte, t_s^0 , que são parâmetros determinados experimentalmente. Portanto, é importante conhecer a influência que estes parâmetros têm na simulação numérica de cada adesivo.

1.2 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo determinar quais as leis coesivas e critérios de propagação em modo misto que melhor descrevem o comportamento em modo misto dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Para isso considerou-se o ensaio ATDCB, que permite calcular a taxa de libertação de energia de deformação dos adesivos em modo misto. Foram realizados ensaios experimentais e traçadas as curvas $P-\delta$ e curvas- R , de onde se retirou os valores para a construção dos envelopes de fratura de cada adesivo com o objetivo de determinar o critério de propagação em modo misto mais adequado para cada adesivo. Para validar o critério de propagação em modo misto e o modelo de dano coesivo escolhido são efetuadas simulações numéricas no

software Abaqus®, onde são inseridas estas leis coesivas e condições idênticas às testadas experimentalmente para cada provete. Para isso, aplicou-se o mesmo comprimento de pré-fenda e foram usados valores de G_{IC} e G_{IIC} obtidos em trabalhos anteriores com geometrias de modo puro. Para estudar a sensibilidade de cada adesivo às variações dos parâmetros G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 , foram traçadas as curvas P - δ numericamente para cada variação de parâmetro e combinação de parâmetros e efetuadas as devidas comparações.

1.3 Organização do relatório

Este trabalho é dividido em quatro capítulos:

INTRODUÇÃO: neste capítulo é apresentada a contextualização, descritos os objetivos e a organização do trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: aqui é apresentada uma revisão bibliográfica referente às ligações adesivas com o objetivo de melhor conhecer as propriedades, aplicações, os esforços e as famílias dos adesivos estruturais. São também apresentados ensaios de determinação de propriedades e ensaios de caracterização à fratura, com a apresentação mais detalhada dos ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e ATDCB e os respectivos métodos de determinação da tenacidade à fratura. Por fim é feita uma breve introdução aos modelos de dano coesivo.

DESENVOLVIMENTO: neste capítulo é descrito todo o trabalho realizado e como foram preparados e efetuados os ensaios experimentais e os respectivos resultados. Também é descrito o procedimento aplicado nas simulações numéricas e a comparação de resultados com os resultados experimentais para validação dos modelos de dano coesivo e critérios energéticos de modo misto utilizados. Por fim, é estudada a sensibilidade de cada adesivo a parâmetros como G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 .

CONCLUSÕES: neste capítulo final são discutidos os resultados, indicados os principais objetivos atingidos e apresentadas perspectivas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Desde sempre que o homem precisa de juntar materiais para construir os mecanismos necessários para a sua sobrevivência. Ao longo da história, tem-se procurado desenvolver novas e melhoradas formas de unir materiais, desde as mais básicas, como apenas amarrando com fibras naturais na pré-história, às mais tecnologicamente sofisticadas dos dias de hoje, como soldar ou utilizar ligações adesivas.

Os adesivos já são usados há muitas centenas de anos. Até tempos relativamente recentes, a maioria dos adesivos era desenvolvido através de substâncias vegetais, animais e minerais. No início século XX, adesivos de polímeros sintéticos começaram a substituir muitos destes produtos naturais graças à sua forte capacidade de adesão, mais variadas possibilidades de formulação e superior resistência aos ambientes de produção [1]. Os adesivos constituídos à base de polímeros sintéticos são capazes de aderir facilmente à maioria dos materiais e de suportar cargas significativamente elevadas, o que possibilitou a utilização de juntas adesivas em aplicações tecnologicamente avançadas. Um significativo crescimento da utilização de adesivos ocorreu nos anos 1940 e 1950 com o desenvolvimento dos adesivos estruturais para a indústria aeronáutica militar. Com experiências de sucesso nestas indústrias, rapidamente se percebeu que os adesivos podiam ser usados para substituir de forma económica os métodos de ligação convencionais como a soldadura, ligações aparafusadas e rebitadas [1].

Uma ligação adesiva é a união de elementos usando adesivos. O adesivo é um material capaz de provocar a adesão de substratos. A adesão é a atração entre duas substâncias resultado de forças intermoleculares que se estabelecem entre si [2]. Os elementos a unir designam-se por substratos, antes da união, ou aderentes, após a união ser efetuada. A região entre o adesivo e o aderente designa-se por interfase (Figura 1). Por vezes é aplicado na superfície um primário antes de ser colocado o adesivo, normalmente para melhorar a colagem ou para proteger a superfície até o adesivo ser aplicado [1].

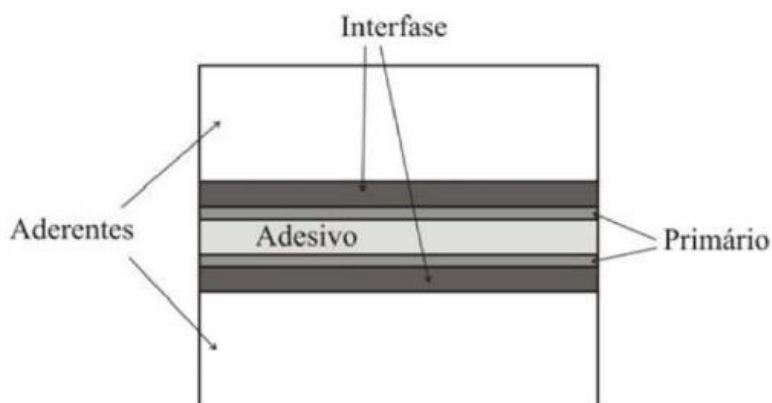


Figura 1 - Constituintes e regiões de uma ligação adesiva [2]

O projeto de uma junta adesiva resistente é bastante complexo, e muitas investigações têm sido realizadas de forma a melhorar o conhecimento sobre esta área. Contudo, esta investigação torna-se especialmente difícil porque esta área envolve o conhecimento das mais variadas ciências (Figura 2).

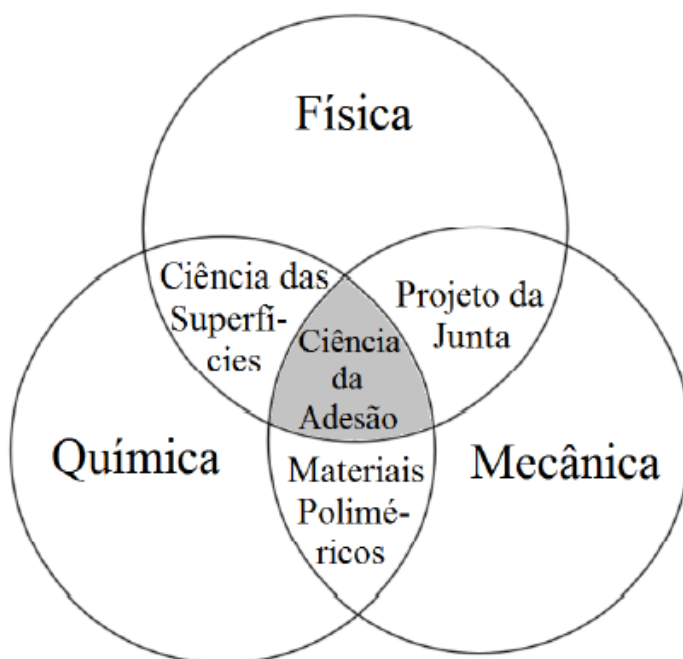


Figura 2 - Influência das variadas ciências no projeto de uma junta adesiva [1]

Para um bom projeto de uma junta adesiva também se deve ter em conta e conhecer todos os materiais que a irão constituir, a compatibilidade entre esses materiais, as condições de trabalho, tanto em termos de carga como ambientais, e deve-se ter vários cuidados como a devida preparação e limpeza dos aderentes e as condições ideais para a cura do adesivo (Tabela 1).

Tabela 1 - Parâmetros a ter em atenção no projeto de uma junta adesiva [3]

Fatores característicos da junta	Parâmetros a ter em atenção
Aderentes	Módulo de Elasticidade
	Coeficiente de Poisson
	Tensão de Cedência
	Tensão de Rotura
Adesivo	Módulo de Elasticidade
	Coeficiente de Poisson
	Tensão de rotura ao corte
	Tensão de rotura à tração
Geometria da Junta	Forma da junta
	Espessura das peças a serem ligadas
	Comprimento/largura de sobreposição
	Espessura da camada de adesivo
Condições ambientais	Temperatura de serviço
	Humidade relativa
	Agentes químicos a que vai estar sujeita
	Radiação
Tratamento Superficial	Rugosidade das superfícies
	Desengorduramento das superfícies
	Eliminação de óxidos
Solicitações	Forças/momentos
	Deslocamentos/rotações

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

A eficiência de uma ligação adesiva depende muito de uma adequada preparação e projeto da ligação. O projeto de uma ligação adesiva torna-se bastante complexo devido aos vários fatores que podem comprometer a junta. A escolha do adesivo adequado também é essencial para eficiência da ligação, uma vez que o adesivo deve ser apropriado para resistir a condições ambientais como temperatura, humidade e exposição a raios UV, deve ser adequado aos materiais a unir e aos processos de fabrico dos estratos, e resistir aos esforços aplicados na junta. Para além do adesivo, para uma ligação adesiva ser eficiente é necessária uma adequada preparação e limpeza dos substratos e um sistema e tempo de cura apropriado. O projeto de uma ligação adesiva deve também procurar evitar esforços mais agressivos para este tipo de juntas, ou seja, devem ser evitados esforços de clivagem ou arrancamento, e a geometria e configuração da junta devem evitar ao máximo estes esforços e prevenir tensões localizadas.

As ligações adesivas são cada vez mais uma alternativa viável às ligações mecânicas nos projetos de engenharia, o que se deve a muitas vantagens que estes tipos de ligações possuem em relação a métodos de união mais tradicionais, nomeadamente:

- Relativamente às ligações aparafusadas e rebitadas as juntas adesivas permitem reduzir o peso e numero de componentes da estrutura, com a devida preparação providenciam uma fixação contínua e uma mais uniforme distribuição de tensões por toda a área a unir, o que permite que a estrutura tenha uma mais elevada rigidez e transmissão de esforços [2]. E ao evitar furos evita concentração de tensões concedendo a estrutura uma maior resistência à fadiga [1];
- Em relação às ligações por soldadura, como o adesivo praticamente não é visível obtêm-se uma aparência estética muito mais agradável [1]. E não provocam alterações estruturais nem das propriedades dos materiais devido às mais baixas temperaturas empregues durante o processo de união;
- Uma junta adesiva bem projetada é frequentemente a opção mais económica, é mais fácil de automatizar o seu processo de fabrico [1, 2] e permite o fabrico de formas complexas e com elevada resistência mecânica;
- São capaz de ligar diferentes materiais, mesmo de diferentes famílias, pois o adesivo, devido à sua elasticidade, é capaz de compensar a diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais [1, 2], e evita a corrosão galvânica entre os aderentes;
- Têm capacidades de vedação [1], isolamento térmico [1] e amortecimento de vibrações [1], sendo que esta última característica também contribui para que tenham uma alta resistência à fadiga [2].

Porém, as ligações adesivas apresentam algumas desvantagens que fazem com que em muitas utilizações seja preferível usar formas de união mais tradicionais:

- A ligação é tipicamente permanente, não sendo possível a sua desmontagem sem destruição da estrutura [1, 2];
- São muito sensíveis às condições atmosféricas como temperatura, humidade e raios UV [1, 2];
- A sua inspeção é mais difícil [2];
- São bastante sensíveis a esforços de clivagem e arrancamento [2], sendo preferível a não utilização deste tipo de juntas nos casos em que não seja possível evitar modificar a geometria ou configuração da junta de forma a evitar este tipo de esforços;
- Necessitam de uma preparação bastante cuidada [1, 2], e o seu processo de cura pode ser bastante dispendioso em termos de tempo e custo [2].

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Para além dos adesivos serem usados em situações de estanquicidade e vedação, são usados atualmente para unir materiais e são cada vez mais capazes em ligações de alta responsabilidade estrutural, o que lhes tem concedido uma cada vez maior importância nos mais diferentes sectores industriais (Figura 3).

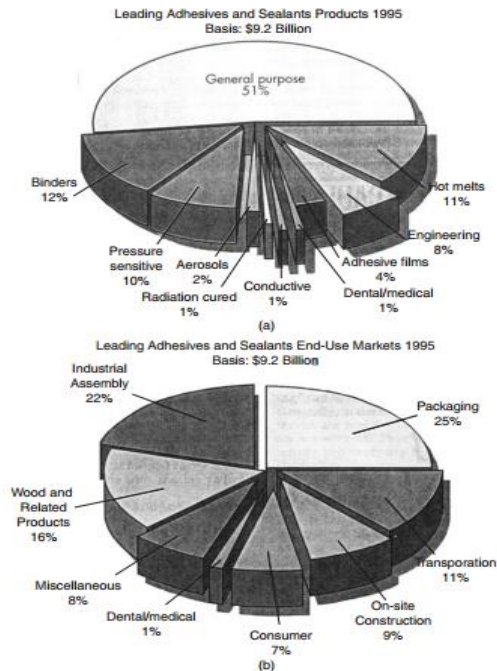


Figura 3 - Principais usos de adesivos e selantes (a) produtos (b) mercado final [1]

Os adesivos conseguem unir os mais variados materiais como o vidro, metal, cerâmica, madeira ou plástico, mas é na aplicação da união de materiais compósitos que se

evidencia mais as suas vantagens. De facto, o processo de ligação por adesivos, não sendo destrutivo, concede a este tipo de ligações uma importante vantagem face às ligações aparafusadas e rebetadas devido à baixa ductilidade e fraca resistência ao esmagamento dos materiais compósitos.

Esta e outras vantagens já referidas provocou nos últimos anos um grande aumento da aplicação de ligações adesivas principalmente na indústria aeronáutica, mas cada vez mais outras indústrias têm vindo a incorporar na sua produção ligações adesivas tais como a indústria automóvel, construção civil, eletrónica, medicina, entre outras.

Adesivos na indústria da Aviação

Desde os anos 40 que se usam adesivos na construção de aviões (Figura 4), e desde então a sua utilização tem vindo a aumentar. A possibilidade de substituir as ligações aparafusadas e rebetadas por ligações adesivas permite construir aviões cada vez mais leves e maiores, e as superfícies lisas resultantes da colagem com adesivos beneficiam bastante a aerodinâmica e permitem hoje em dia construir aviões capazes de transportar centenas de pessoas.

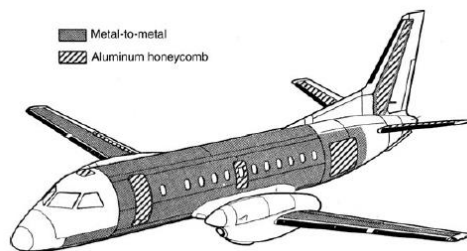


Figura 4 – Uso de ligações adesivas no avião SAAB 340, fuselagem, asas e cauda [2]

Junto com o aumento significativo do uso de materiais compósitos na estrutura dos aviões, os adesivos, sendo o método mais adequado para unir este tipo de materiais, têm visto a sua aplicação generalizar-se cada vez mais na indústria da aviação (Figura 5).

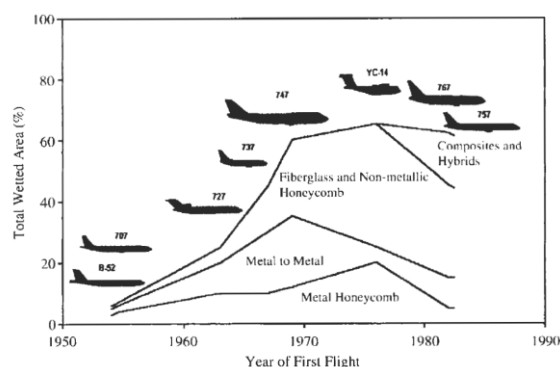


Figura 5 – Aumento do uso de adesivos na construção do avião Boeing [4]

Apresentam-se de seguida as principais razões do uso de adesivos na construção de aviões:

- Redução de Peso: a substituição de parafusos e rebites por adesivos na estrutura, para além de permitir a utilização de materiais compósitos, beneficia a redução de peso do avião;
- Melhor resistência à fadiga: os furos necessários para a ligação por parafusos ou rebites provocam concentrações de tensões que podem levar à rotura, enquanto as ligações adesivas garantem uma distribuição mais uniforme das tensões (Figura 6) prolongando a vida da junta;

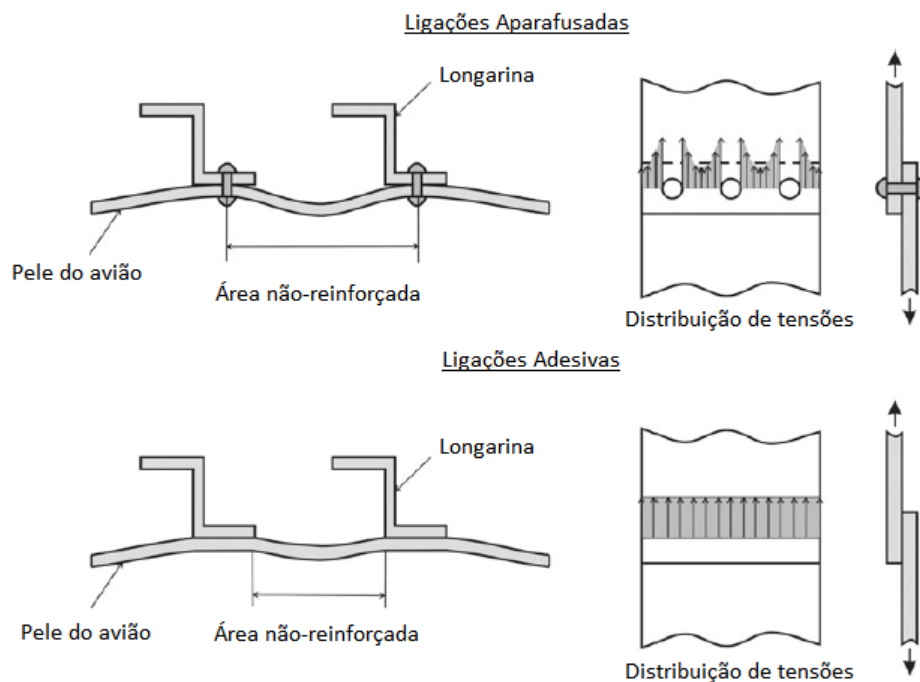


Figura 6 – Melhoria da rigidez (esquerda) e da distribuição de tensões (direita) de uma junta adesiva em relação a uma junta aparafusada [2]

- Melhoria do amortecimento sonoro: a camada de adesivo também absorve alguma da energia acústica associada com a estrutura. o que leva a reduzir a propagação de ruídos de alta frequência [4];
- União de diferentes materiais: para além de unirem metais e madeira, os adesivos também podem ser usados para unir vidro, plásticos e materiais compósitos;
- Redução do tempo e dos custos de produção: Para além de permitirem o uso de placas mais finas, tornam também o processo de montagem mais rápido;
- Obtenção de superfícies lisas: Para além dos fatores estéticos também melhoram a aerodinâmica do avião.

Adesivos na Indústria automóvel

As ligações adesivas têm-se tornado cada vez mais importantes para a indústria automóvel, que é uma das mais ativas indústrias na utilização de adesivos (Figura 7).

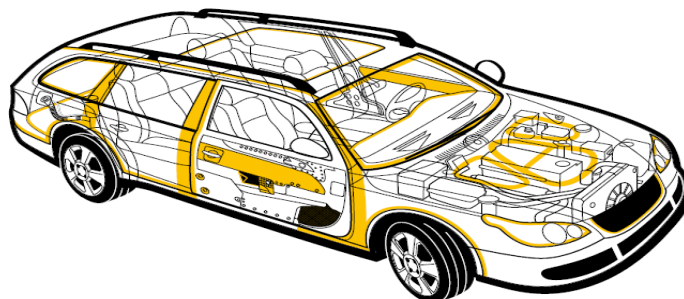


Figura 7 - Utilização de adesivos na construção de um automóvel [5]

Esta tecnologia já era usada na colagem do tejadilho, das portas e do para-brisas, mas com a introdução de uma nova geração de adesivos estruturais na construção da estrutura da carroçaria do automóvel, estes adesivos contribuíram para se construir corpos de automóveis mais leves e com maior resistência ao impacto [2].

A possibilidade de construir veículos cada vez mais leves com o uso de adesivos veio satisfazer os vários objetivos da indústria automóvel, que procura construir veículos mais rápidos, resistentes e com menores consumos. Uma outra vantagem dos adesivos, face aos métodos de ligação convencionais, e que também é muito importante para a indústria automóvel, é a capacidade de unir diferentes materiais, o que possibilita que sejam usados em conjunto materiais como o aço de alta resistência, compósitos e ligas de alumínio e magnésio.

Principais aplicações nos automóveis

De seguida são apresentadas as principais aplicações das juntas adesivas na construção dos automóveis.

- **Vidragem direta**

São aplicados adesivos nas margens dos vidros e posteriormente é colado o para-brisas na carroçaria (Figura 8).

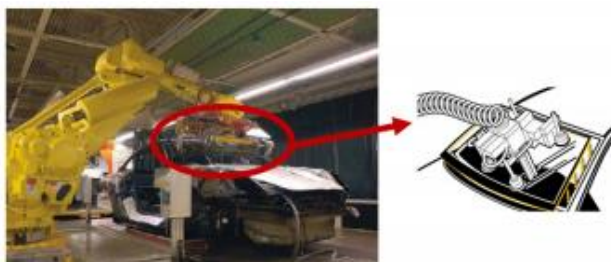


Figura 8 - Vidragem direta [5]

- **Exterior**

São usados adesivos nas luzes, sistema elétrico, caixilhos metálicos, de plástico ou de madeira, nas borrachas das portas, elementos decorativos e spoilers.

- **Interior**

Os tabliers são compostos por materiais poliméricos e por plásticos reforçados com fibras, pelo que a sua adesão à carroçaria é feita com o auxílio de adesivos à base de água e poliuretanos. São também usados no revestimento das malas, mostradores eletrónicos, consolas de bordo e outros instrumentos eletrónico (Figura 9) [5].



Figura 9 - Exemplos de pontos do automóvel onde são aplicados adesivos [5]

- **Estrutura da carroceria**

A colagem com adesivos de elementos da estrutura da carroceria com elevada resistência ao impacto começou a ser feita em larga escala no final do século XX usando ligações híbridas, que combinam ligações adesivas com soldadura por pontos, rebites ou parafusos [2].

- **Reforço estrutural do chassi**

Estas tecnologias resumem-se a sistemas tridimensionais de plástico, aços ou compósitos agregados com epóxidos a locais específicos que fazem com que a estrutura do chassi se torne mais segura (Figura 10) [5].

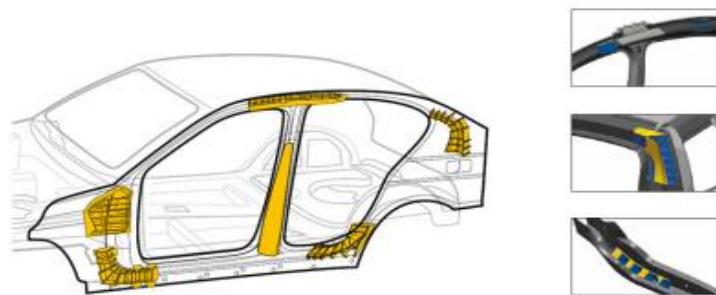


Figura 10 - Locais de aplicação da tecnologia de reforço estrutural [5]

- **Redução e amortecimento do ruído**

O uso de adesivos para selar, ligar e revestir certos materiais permite reduzir o barulho das vibrações e melhorar a acústica no interior dos automóveis (Figura 11).



Figura 11 - Locais da porta onde se aplicam adesivos com vista a amortecer o ruído [5]

Indústria dos veículos sobre carris

Recentemente, a alta velocidade, o conforto dos passageiros, a segurança e a questão ambiental tornaram-se objetivos indispensáveis para os veículos sobre carris, o que leva à importância da redução de peso, alta resistência estrutural, alta rigidez, isolamento sonoro, amortecimento de vibrações, incombustibilidade e reciclabilidade [2]. Para atingir estes objetivos, a adesão é uma tecnologia de ligação indispensável para a indústria dos veículos sobre carris [2].

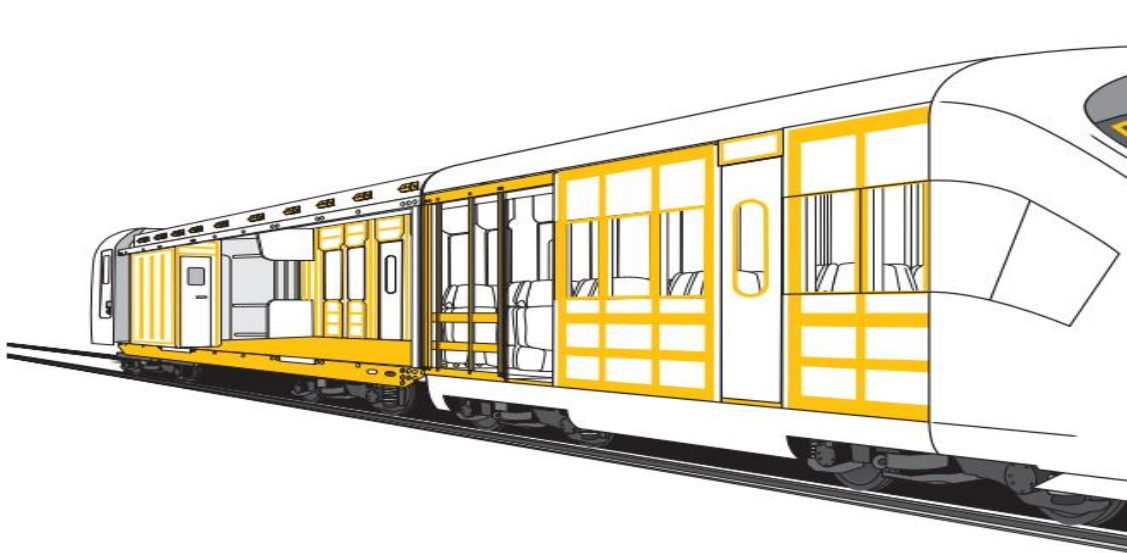
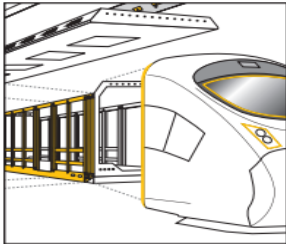



Figura 12 - Aplicações de adesivos na construção de um comboio [6]

Os adesivos têm as mais variadas aplicações nas construções de veículos sobre carris, como se pode ver na Figura 12 e Tabela 2.

Tabela 2 - Aplicações de adesivos nos comboios [6]

	Aplicação	Objetivo
 <p>Figura 13 - Uso de adesivos na vidragem direta [6]</p>	Vidragem direta	<ul style="list-style-type: none"> • Maior rigidez à torção da carruagem; • Melhoria da aerodinâmica; • Reduz a corrosão evitando a acumulação de água.
 <p>Figura 14 - Uso de adesivos na ligação de componentes exteriores de comboios [6]</p>	Ligação de componentes exteriores	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de peso; • Absorção de ruído e vibrações; • Permite a aplicação de técnicas de montagem modular; • Maior resistência ao impacto.
 <p>Figura 15 - Uso de adesivos na ligação de componentes interiores de comboios [6]</p>	Ligação de componentes interiores	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de ligar vários materiais evitando a corrosão; • Alta resistência ao impacto; • Não provoca danos na estrutura ao perfurar ou soldar.
 <p>Figura 16 - Utilização de adesivos na colagem do piso em comboios [6]</p>	Colagem do piso	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à água; • Redução de ruído e vibração interior; • Evitar a perfuração do chassis.

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

O fator determinante na resistência de uma junta é a distribuição de tensões. E embora as ligações adesivas sejam um método de ligação que permite uma excelente distribuição de tensões, estas não estão totalmente livres de conter concentração de tensões. Estas concentrações de tensões podem ocorrer devido a uma má preparação da junta, ou a mudanças de volume do elastómero, que podem ser resultado de variações de temperatura, absorção de água ou outros solventes ou devido à evaporação dos ingredientes voláteis [7]. Mas a mais frequente fonte de tensões é provocada pelos esforços aplicados na junta. Estes esforços podem ser aplicados de 5 formas, por tração, compressão, corte, arrancamento e clivagem (Figura 17).

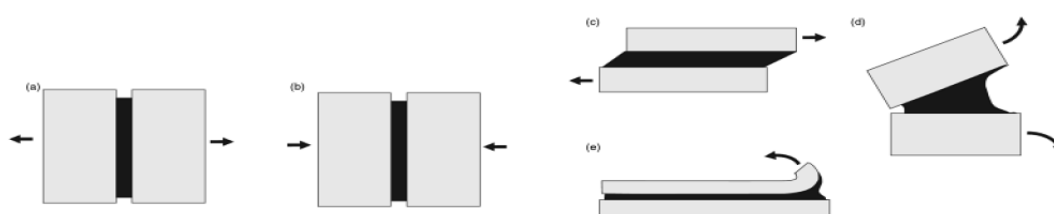


Figura 17 - Tipos de esforços em juntas adesivas (a) tração (b) compressão (c) corte (d) clivagem (e) arrancamento [1]

Tração

As tensões de tração desenvolvem-se quando atuam forças perpendicularmente ao plano da junta distribuídas uniformemente por toda a área colada [1]. Sob tensão, desenvolvem-se nas arestas exteriores da junta altos picos de concentração de tensão e essas arestas suportam uma desproporcional quantidade de esforço (Figura 18).

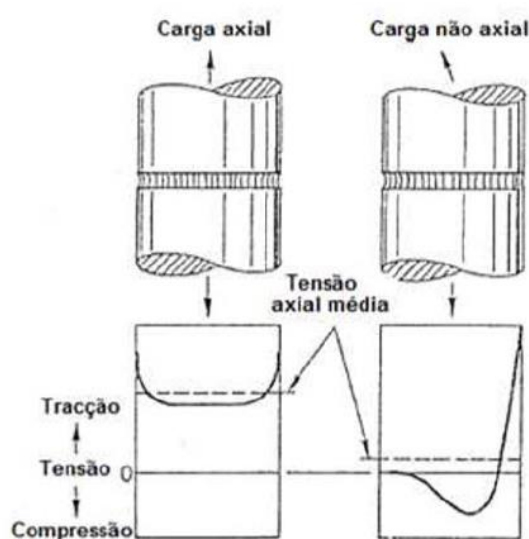


Figura 18 - Distribuição de tensões numa junta topo a topo sob axial e não-axial esforço [1]

A junta deve ser desenvolvida de forma a que as superfícies dos aderentes estejam paralelas e que apenas se desenvolvam cargas axiais, e devem incluídos aderentes com rigidez suficiente para garantir a distribuição uniforme das cargas axiais [1].

Compressão

As tensões de compressão atuam no sentido oposto das tensões de tração. Tal como nas tensões de tração, devem-se manter as cargas alinhadas para que o adesivo sofra apenas tensão de compressão. Um adesivo sob cargas de compressão dificilmente irá sofrer rotura, mas pode romper em locais mais fracos onde haja concentração de tensões [1].

Corte

As tensões de corte desenvolvem-se quando os esforços atuam no plano do adesivo e forçam a separação os aderentes [1]. Os adesivos normalmente são mais fortes quando sofrem tensões de corte porque toda a área colada contribui para a resistência da junta e os aderentes são relativamente fáceis de manter alinhados.

A maioria das tensões são localizadas nas extremidades da junta, enquanto que a parte interior do adesivo contribui pouco para a resistência da junta [8-11] (Figura 19). Este comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade até à extremidade oposta da sobreposição [12, 13].

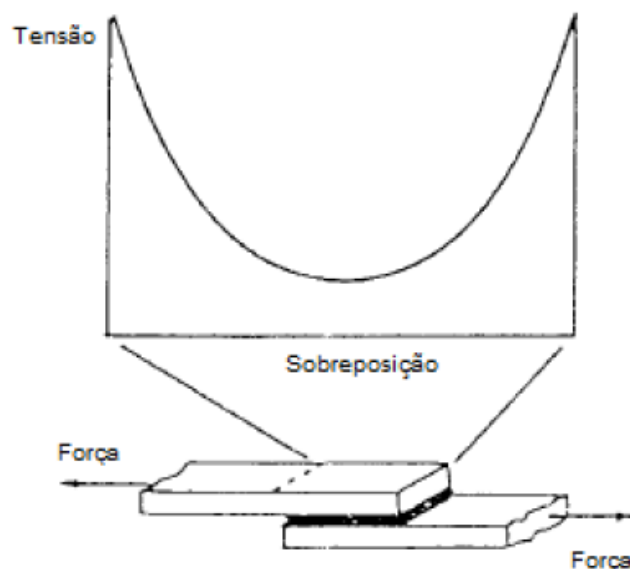


Figura 19 - Distribuição de tensões de um adesivo sob tensões de corte [1]

Este efeito torna-se mais marcante com o aumento do comprimento de sobreposição [14-16]. Por este motivo, a largura da sobreposição é mais importante que o seu comprimento [17]. O aumento da largura aumenta a resistência da junta porque aumenta a área em cada um dos extremos da zona de sobreposição, que corresponde aos locais onde o nível de tensões é mais elevado [17]. Já aumento do comprimento de sobreposição também aumenta a resistência da junta, mas também aumenta a deformação diferencial dos aderentes, portanto, o seu efeito vai diminuindo (Figura 20).

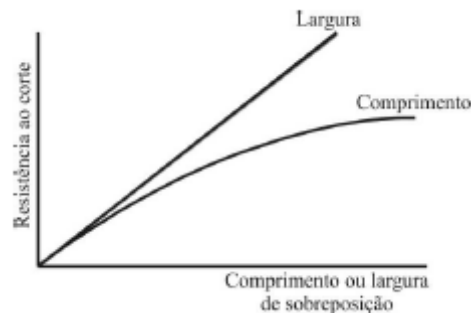


Figura 20 - Comparação do efeito da largura e do comprimento de sobreposição na resistência da junta ao corte [17]

Clivagem

Ocorre quando as forças atuam numa extremidade de junta adesiva rígida e forçam os aderentes a separar-se, sendo uma forma de tensão indesejada [1].

Juntas sob este tipo de carga são menos resistentes do que sob tensões de corte porque a carga é concentrada numa pequena área da junta. Toda a carga é suportada por uma das extremidades da junta (Figura 21).

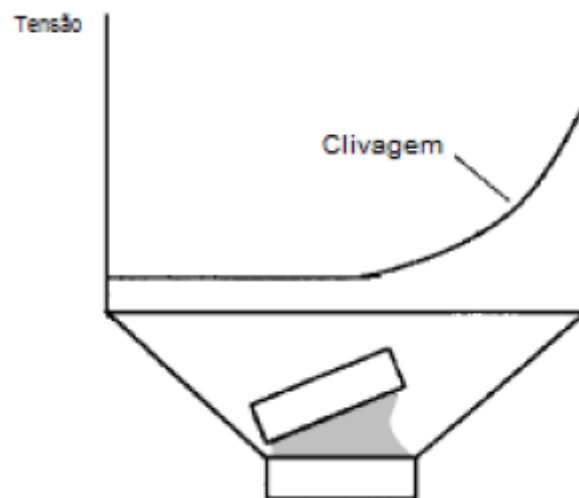


Figura 21 - Distribuição de tensões numa junta sob cargas de clivagem [1]

Arrancamento

Tal como a clivagem, o arrancamento também é um tipo de tensão a evitar, e ocorre quando um ou ambos os aderentes são flexíveis. A distribuição de tensões, embora sendo idêntica à de clivagem, provoca uma maior concentração de tensão na extremidade da junta devido ao maior ângulo de separação dos substratos [1] (Figura 22).

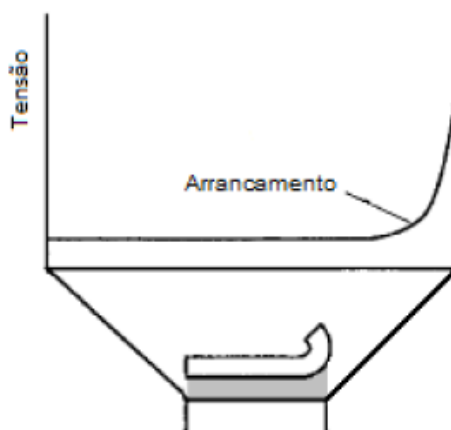


Figura 22 - Distribuição de tensões de arrancamento e de clivagem [17]

Tipos de rotura

A rotura em juntas adesivas pode ocorrer de várias formas (Figura 23):

- Rotura adesiva (a), na interface entre o adesivo e o aderente;
- Rotura coesiva (b), ao longo da camada de adesivo;
- Rotura de um dos aderentes (c), quando o aderente é mais fraco que a ligação adesiva;
- Rotura mista (d), ocorrem ambas as roturas, adesiva e coesiva.

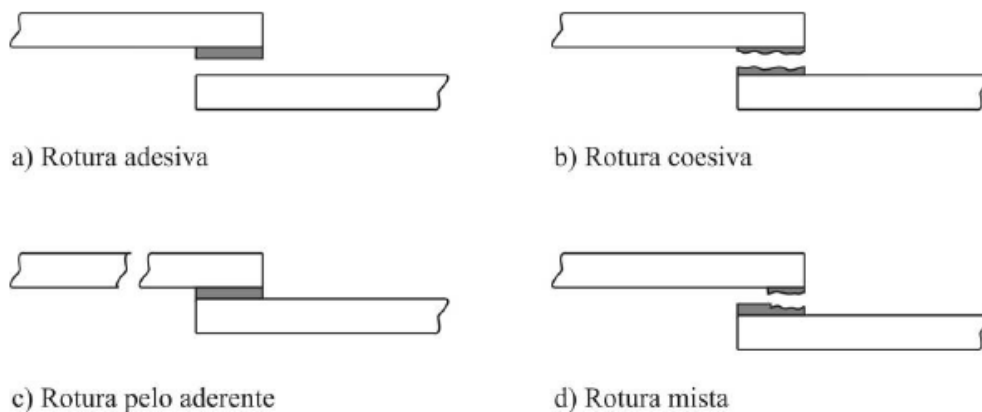


Figura 23 - Tipos de rotura [17]

Rotura coesiva

Ocorre quando a rotura se propaga totalmente ao longo da camada do adesivo. É considerada assim quando após a rotura a camada de adesivo se mantém em ambos os aderentes. Quando este tipo de rotura ocorre pode-se concluir que as forças de ligação entre o adesivo e o aderente são superiores às forças internas do adesivo [1, 17] (Tabela 3). Este tipo de rotura é geralmente o pretendido visto que significa que a ligação entre o aderente e o adesivo é resistente [7]. Também pode ser considerada rotura coesiva quando a rotura ocorre no aderente, Tabela 3, sendo assim chamada de rotura coesiva do aderente [17].

Tabela 3 - Relação entre tipo de rotura e diferença de resistência dos diferentes constituintes da junta [1]

Modo de rotura	Força da ligação entre os diferentes constituintes da junta
Adesiva	Força coesiva > Força da interface
Coesiva	Força da interface > Força coesiva
Do Aderente	Força coesiva e da interface > Resistência do aderente
Mista	Força da interface = Força coesiva

Rotura adesiva

Neste caso a rotura ocorre ao longo da interface entre o adesivo e o aderente [7, 17]. A camada adesiva separa-se totalmente de um dos aderentes, o que se pode dever a uma má preparação da superfície dos aderentes [7, 17]. Contudo, trabalhos recentes [18-20] mostraram que, em juntas coladas de sobreposição simples, existe variação de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo, e que os valores máximos destas tensões ocorrem junto da interface.

Rotura mista

É quando ocorre tanto rotura adesiva quanto rotura coesiva, sendo que após a rotura se pode verificar que numa zona ambos os aderentes contêm camada adesiva e noutra zona apenas um aderente se apresenta com camada adesiva. Este modo de rotura pode ocorrer devido a limpeza deficiente de uma dada região das superfícies a ligar, ou à mistura/aplicação do adesivo [17].

2.1.4 Configurações possíveis de junta

A geometria das juntas adesivas representa um dos maiores desafios no projeto de estruturas em geral e em particular em estruturas em material compósito, uma vez que

implicam descontinuidades na geometria da estrutura e das propriedades da estrutura e/ou do material, e introduzem pontos de concentração de tensões elevadas [21]. A junta de ligação ideal é aquela que sob todas as condições práticas de carregamento, o adesivo é tensionado na direção em que é mais resistente o que pode ser conseguido escolhendo a configuração certa [1]. Algumas tensões, como as de clivagem e arrancamento, devem ser minimizadas e outras, como as de corte e compressão, devem ser maximizadas [21]. O desenho da junta também deve garantir uma distribuição o mais uniforme possível da tensão sobre a área colada e evitar ao máximo as concentrações de tensões [17]. Também se deve saber que, geralmente, quanto mais rígido o aderente relativamente ao adesivo, mais uniforme é a distribuição dos esforços na junta e maior é a resistência da ligação [22]. A junta também deve apresentar uma espessura uniforme e a camada adesiva deve ser isenta de vazios [17].

A seguir são descritas as configurações mais comuns de juntas adesivas:

- **Juntas de Topo a Topo**

São as mais comuns e fáceis de fabricar [23]. Contudo, apresentam elevadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades, o que as torna pouco eficazes [24]. Para além disso, este tipo de configuração não consegue suportar cargas de flexão pois o adesivo iria sofrer forças de clivagem [17, 25-27]. Podem ser melhoradas de forma a reduzir a carga lateral (Figura 24). O uso de uma configuração com chanfro, duplo topo a topo com sobreposição ou macho-fêmea reduz o gradiente de tensão ao longo do adesivo [28-31], mas a sua maquinagem torna estas juntas mais caras e complexas de fabricar.

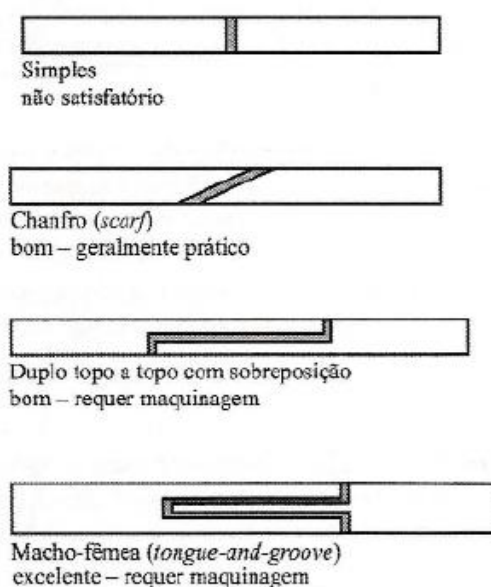


Figura 24 - Tipos de junta topo a topo [1]

- **Sobreposição simples**

É a junta mais utilizada em aplicações industriais pois é simples de fabricar [32, 33], é aplicável com aderentes de baixa espessura e submete o adesivo maioritariamente a tensões de corte. Contudo se forem usados aderentes relativamente flexíveis há a tendência para haver a flexão dos aderentes o que provocam desalinhamentos na área colada (Figura 25).

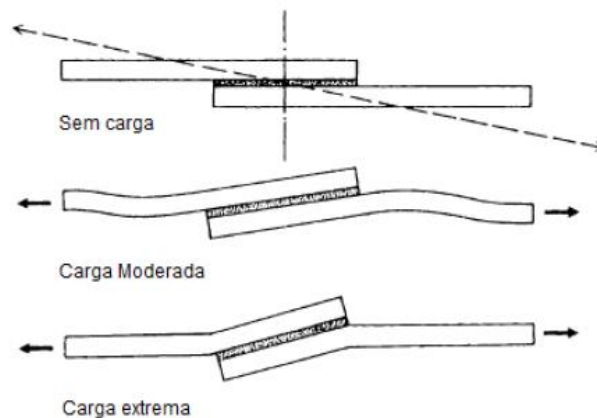


Figura 25 - Distorção causada por concentração de tensões [34]

Os desalinhamentos provocam tensões de clivagem nas extremidades da junta reduzindo, consideravelmente a sua resistência [23]. Este efeito indesejado pode ser reduzido modificando ligeiramente a geometria dos aderentes (Figura 26).

As juntas com chanfro e reforço duplo reduzem as tensões de arrancamento. Porém, a solução mais simples e eficaz para garantir um alinhamento das forças numa junta de sobreposição simples é a utilização da junta de ressalto [1].

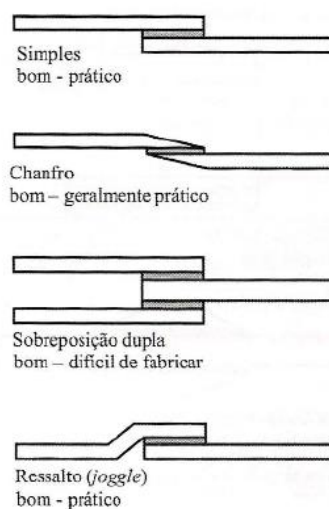


Figura 26 - Junta de sobreposição simples e configurações melhoradas [1]

- **Cobre-junta**

Este tipo de configuração permite manter as cargas alinhadas, e é normalmente usada quando as juntas de sobreposição são impraticáveis. Tal como estas últimas também sofrem de tensões de clivagem quando a junta é submetida a flexão [1]. Também permite algumas modificações de forma a reduzir este efeito, tendo como inconvenientes a sua fabricação mais complexa (Figura 27).

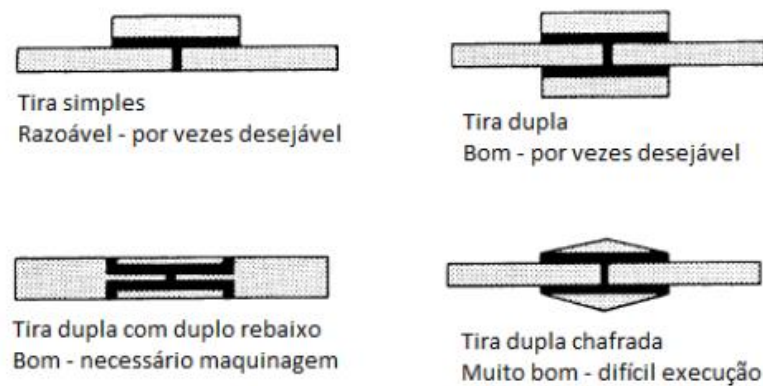


Figura 27 - Configuração de cobre junta e formas melhoradas [1]

- **Junta Tubular**

Estas juntas resistem melhor à flexão e a área colada é maior, porém a maioria destas juntas necessita de trabalhos de maquinagem [1] (Figura 28).

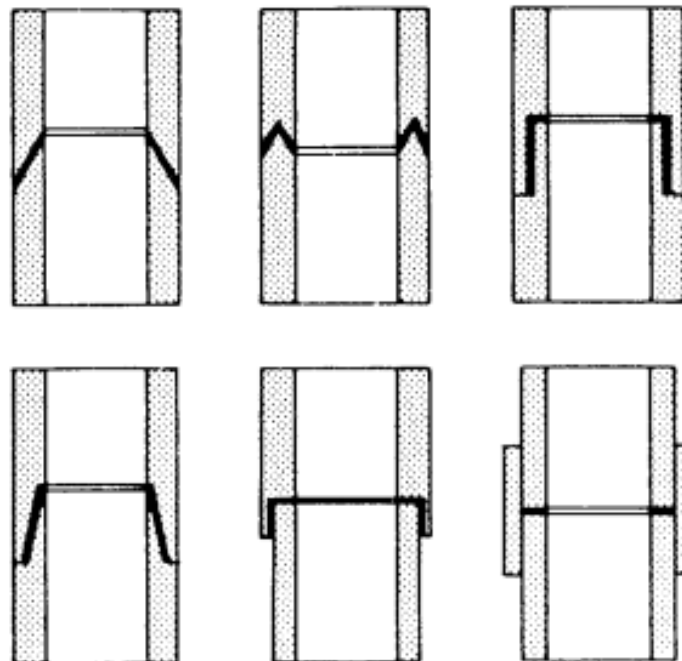


Figura 28 - Várias configurações de juntas tubulares [1]

2.1.5 Adesivos estruturais

Adesivos estruturais são adesivos que conseguem resistir a cargas significativas e que são responsáveis pela resistência e rigidez da estrutura [2]. São capazes de suportar tensões de corte acima de 7 MPa [1]. É normalmente suposto resistirem durante toda a vida útil da aplicação [1].

Tipos de Adesivos Estruturais

- **Epóxidos**

Os adesivos epóxidos são provavelmente a família de adesivos mais versátil porque estes adesivos ligam eficientemente diferentes substratos e podem facilmente ser modificados para alcançar as mais variadas propriedades [1]. Estes adesivos também exibem um baixo nível de contração durante a cura, baixa deformação sob prolongado esforço [2] e não formam voláteis durante a cura [35]. Exibem uma excelente resistência à tração, mas fraca resistência ao arrancamento [1].

Estes adesivos apresentam uma enorme diversidade de aplicações, podendo ser empregues na ligação de quase todos os materiais utilizados na construção mecânica [17]. São tipicamente usados em revestimentos, união de materiais compósitos, aplicações elétricas e eletrônicas, materiais de construção e aplicações na área da engenharia civil [2].

Vários polímeros podem ser misturados com resinas de epóxido para obter certas características desejáveis. Alguns dos tipos de adesivos híbridos de epóxido são apresentados de seguida:

- **Epóxido-fenólico**

São formulados combinando resina de epóxido com resina fenólica para melhorar o desempenho sobre altas temperaturas das normais resinas epóxidas. São apropriados para esforço constante a 175 °C ou esforço intermitente a 260 °C [1]. Têm uma excelente resistência a líquidos, óleos, solventes e humidade, contudo, devido à natureza rígida dos constituintes, têm baixa resistência ao arrancamento e ao impacto, e limitada resistência ao choque térmico [23]. Para além de aplicações a altas temperaturas também são usados para colar vidro, cerâmicos e materiais compósitos de matriz fenólica. Devido à sua relativamente elevada capacidade de escoamento estes adesivos são os indicados para compósitos em ninho de abelha [23].

- **Epóxido-polissulfido**

Apresentam boa resistência química, bom comportamento na exposição a intempéries e boa resistência ao impacto, sendo vocacionados para

aplicações sujeitas a choques e vibrações [17]. São normalmente usados em aplicações que requerem um alto nível de alongamento [23] e para colar substratos com diferentes coeficientes de dilatação.

➤ **Epóxido-poliamida**

Este tipo de combinação tem como objetivo conceder ao adesivo uma boa flexibilidade, resistência à fadiga e impacto, uma elevada resistência ao corte e uma extremamente elevada resistência ao arrancamento [1]. A sua principal limitação é a sua fraca resistência à humidade. São normalmente usados para colar painéis de alumínio a núcleos de ninho de abelha em estruturas de aviação [23].

➤ **Epóxido-poliuretano**

Tal como a combinação com poliamida esta combinação é formulada com o objetivo de fortalecer o adesivo aumentando-lhe a resistência ao corte e arrancamento [23]. Apresentam também boa resistência à fadiga [17].

➤ **Epóxido-nitrilo**

É uma terceira combinação com o objetivo de aumentar a resistência do adesivo a esforços. Apresentam uma resistência satisfatória à humidade, mas não tão boa como as combinações com resinas fenólicas [1]. Estes adesivos são muito aplicados na construção e manutenção de aviões comerciais a jato [3, 17].

• **Fenólicos**

Este tipo de adesivos apresenta uma boa resistência a altas temperaturas, aos agentes ambientais e são relativamente baratos [1]. Contudo, são adesivos frágeis, com baixa resistência ao impacto e também sofrem corrosão por solventes. Eram inicialmente utilizados para colar madeira [3], mas também podem ser usados para colar metal a vidro. Devido à sua alta resistência a altas temperaturas, são usados em moldes de fundição, lixas, rodas abrasivas e revestimentos de travões [23]. Para corrigir a elevada fragilidade estes adesivos foram desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com uma resina vinílica ou um elastómero (nitrilo ou policloropreno) [3].

➤ **Fenólico-nitrilo**

A principal vantagem da combinação de resina fenólica com borracha de nitrilo é melhorar a resistência ao arrancamento sem reduzir significativamente a resistência do adesivo a altas temperaturas [1]. Esta capacidade permite colar o revestimento de calços de travões, na indústria de aviação para colar painéis de alumínio a estruturas em ninho de abelha, e uso na eletrónica, calçado e montagem de mobília.

➤ **Fenólico-vinílico**

Apresentam uma excelente resistência química, ao corte, arrancamento e impacto, o que faz destes adesivos um dos mais bem-sucedidos adesivos estruturais para metais [23]. Contudo, devido aos seus constituintes termoplásticos, a sua resistência a altas temperaturas é afetada. Uma importante aplicação destes adesivos é para colar a folha de cobre a plásticos laminados em placas de circuitos impressos [23].

➤ **Fenólico-policloropreno**

Apresentam uma elevada resistência à deformação e à maioria dos ambientes de serviço o que lhes concede a capacidade de resistir a esforços prolongados [1]. São também altamente resistentes à fadiga e impacto [23]. Contudo a sua resistência ao corte é mais baixa do que as outras combinações de adesivos fenólicos.

- **Poliamidas**

São os adesivos mais estáveis a altas temperaturas (superiores a 200°C) [17]. Estes adesivos apresentam uma grande dureza e uma certa fragilidade, apresentando uma baixa resistência a choque e vibrações [3]. Contudo, são caros e necessitam de altas temperaturas de cura [23]. Por estas razões são usados na indústria aeronáutica.

- **Poliuretanos**

Apresentam resistências ao corte e à tração inferiores aos outros adesivos [3]. Apresentam boa flexibilidade, bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência ao arrancamento, à abrasão, a choques e vibrações, boa tenacidade e bom comportamento quando sujeitos a intempéries [17]. Estes adesivos apresentam uma resistência de rotura ao corte de 20 MPa, podendo assim, ser usados em aplicações estruturais [3, 17]. Os principais mercados em que são usados são a indústria têxtil, produtos de floresta e empacotamento [36].

- **Acrílicos**

Adesivos estruturais contendo monómeros acrílicos são curados pela adição de um radical livre à polimerização à temperatura ambiente [35]. São adesivos multifacetados que são capazes de serem aplicados de muitas formas [36]. Neste tipo de adesivos incluem-se os adesivos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados.

➤ **Anaeróbicos**

São assim chamados porque curam quando o ar é expirado da resina. Apresentam uma resistência bastante variável, que pode ser da ordem da

dos epóxidos, uma boa resistência a solventes e, em geral, a sua temperatura máxima de utilização situa-se próximo dos 150°C [3, 17]. São capazes de colar todos os metais, vidros, cerâmicos e plásticos termo endurecidos. São resistentes à humidade, a solventes e à água do mar [1]. A indústria automóvel é o maior mercado para os adesivos anaeróbicos. Outras aplicações incluem montagem de máquinas, manutenção e reparação [36].

➤ **Cianoacrilatos**

Tornaram-se conhecidos quando introduzidos no mercado como “supercola”. São mais rígidos e menos resistentes à humidade do que os anaeróbicos [1], apresentam também baixa resistência a altas temperaturas, ao corte e arrancamento. Os mercados onde são usados incluem a indústria eletrónica e dos brinquedos [36].

➤ **Acrílicos modificados**

São modificados com a introdução de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo [17]. São resistentes ao arrancamento, cisalhamento, e ao impacto sob temperaturas entre os -100 °C e os 120 °C [1]. São especialmente recomendados para a colar metais, plásticos e superfícies oleosas. São também resistentes a humidade elevada e a sua cura é rápida. São utilizados em operações de montagem de alta velocidade.

Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos tipos e características dos adesivos estruturais.

Tabela 4 - Tipos e características dos adesivos estruturais [3]

Tipo	Apresentação	Temp. máxima de utilização em continuo [°C]	Resistência				
			Corte [MPa]	Fatiga	Arrancamento	Choque	Solvente
Fenólico-vinílico	Líquido monocomponente Líquido + pó Filme	100 a 130	17 a 35	boa	média	boa	mediocre
Fenólico-Nitrilo	Líquido monocomponente Filme	140 a 170	15 a 30	boa	média	boa	boa
Anaeróbicos (acrílicos)	Líquido monocomponente	120 a 150	10 a 40	média	boa	boa	média
Cianoacrilato	Líquido monocomponente	80	10 a 35	má	mediocre	má	má
Poliuretano	Líquido de dois componentes	90	8 a 15	boa	média	boa	boa
Poliimida	Filme	250 a 300	10 a 15	má	boa	mediocre	boa
Epóxido	Diversa	80 a 150	15 a 45	mediocre	boa	má	boa
Epóxido-Poliimida	Líquido de dois componentes	80	15 a 25	boa	mediocre	boa	mediocre
Epóxido-Poliulfido	Líquido de dois componentes	80	15 a 25	boa	mediocre	boa	boa
Epóxido-Fenólico	Líquido monocomponente Filme	200 a 250	20	mediocre	boa	má	boa
Epóxido-Nitrilo	Filme	100 a 120	10 a 46	média	boa	boa	boa

2.2 Determinação das propriedades dos adesivos

Um dos mais importantes fatores a ter em conta para escolher um adesivo são as suas propriedades. É importante saber o seu comportamento às várias possíveis configurações de carga, o seu comportamento aos vários possíveis ambientes de serviço, a sua durabilidade, entre outras características. Para isso é necessário testar os adesivos, com essa finalidade, têm sido desenvolvidos vários testes normalizados, havendo duas formas de o fazer, usando provetes de adesivo maciço e testando os adesivos numa junta.

2.2.1 Ensaios de adesivo maciço

Os ensaios usando provetes de adesivo maciço são frequentemente estudados como parte do processo de desenvolvimento de materiais. Este tipo de testes apenas testa o adesivo, excluindo do teste as zonas de interface, interfase e substrato.

Têm sido usados para estudar, como exemplo, os efeitos de diferentes combinações de resinas e endurecedores, e o efeito da adição à formulação do adesivo de partículas que aumentam a sua resistência, são também usados para determinar a resistência à fratura sob diferentes condições de carga, como exemplo, carga quase estática e fadiga, e também servem para investigar os efeitos da temperatura e ambiente [2].

Os provetes maciços são normalmente fabricados por injeção do adesivo num molde (Figura 29) ou por pressão entre placas [37] (Figura 30).

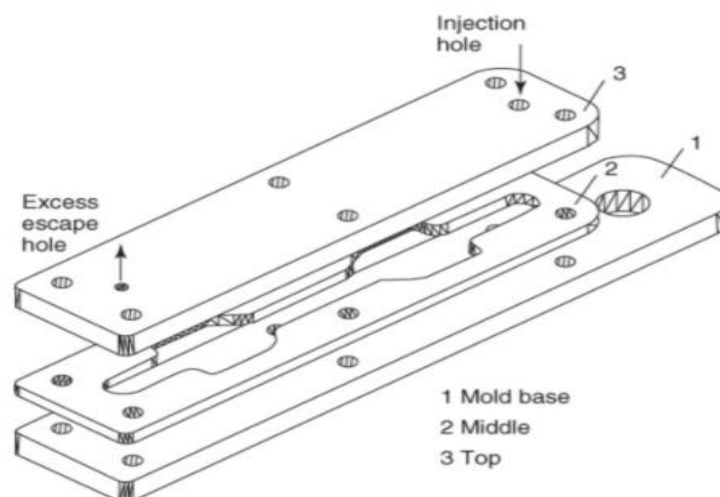


Figura 29 - Esquema de produção de um provete maciço por injeção [37]

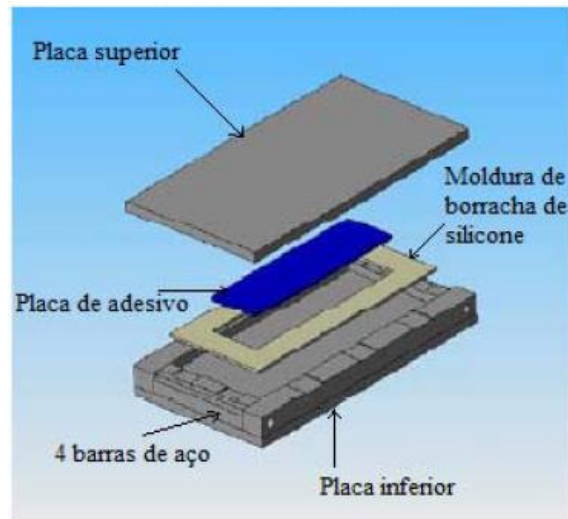


Figura 30 - Esquema de produção de um provete maciço por pressão entre placas [37]

A espessura dos provetes usados nestes testes deve ser a menor possível de forma a representar a fina camada de adesivo presente nas juntas [37].

2.2.2 Ensaio de tração em provetes de adesivo maciço

É um dos mais comuns tipos de testes para determinar a resistência à tração dos adesivos [23]. As propriedades determinadas são intrínsecas ao material e são obtidas sob um estado de tensão uniforme e uniaxial, sem influência dos aderentes. Contudo, as propriedades determinadas por este teste podem ser diferentes das determinadas em junta [23].

É utilizado um provete em forma de “osso de cão” de acordo com a norma EN ISO 527:2 (Figura 31).

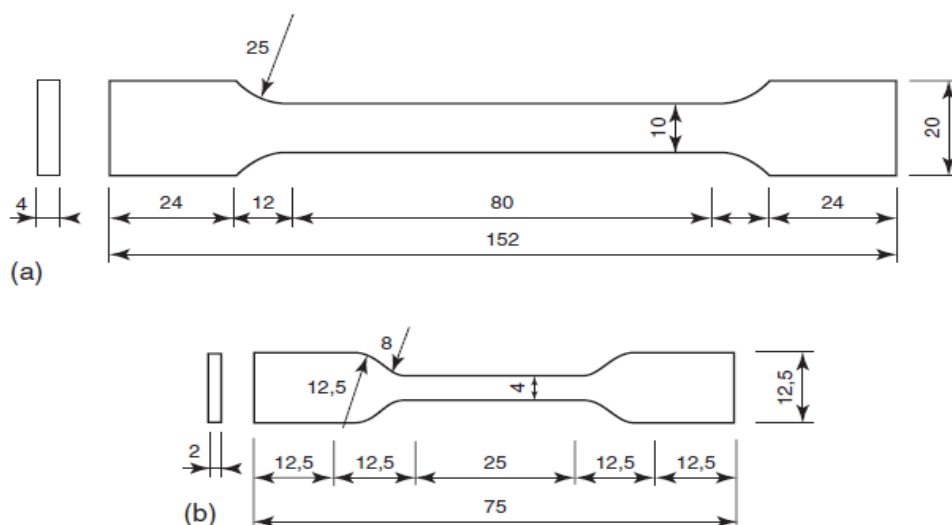


Figura 31 - Geometria e dimensões dos provetes maciços para teste à tração segundo a norma EN ISO 527:2 a) provete longo e b) provete curto [23]

Os provetes longos são usados para adesivos mais rígidos em que a deformação é menor, enquanto que os provetes curtos são utilizados para adesivos mais flexíveis [23]. As propriedades do adesivo são dependentes da espessura da amostra, especialmente se houver muitos vazios no provete [23]. Normalmente é usada uma espessura de 2 mm [23]. As propriedades como o módulo de Young, a resistência à tração e a tensão de rotura podem ser obtidas através da curva tensão/deformação (Figura 32).

O coeficiente de Poisson pode ser determinado desde que o deslocamento seja medido nas direções longitudinal e transversal. Esta propriedade é muito difícil de determinar experimentalmente, especialmente na extensão elástica [23].

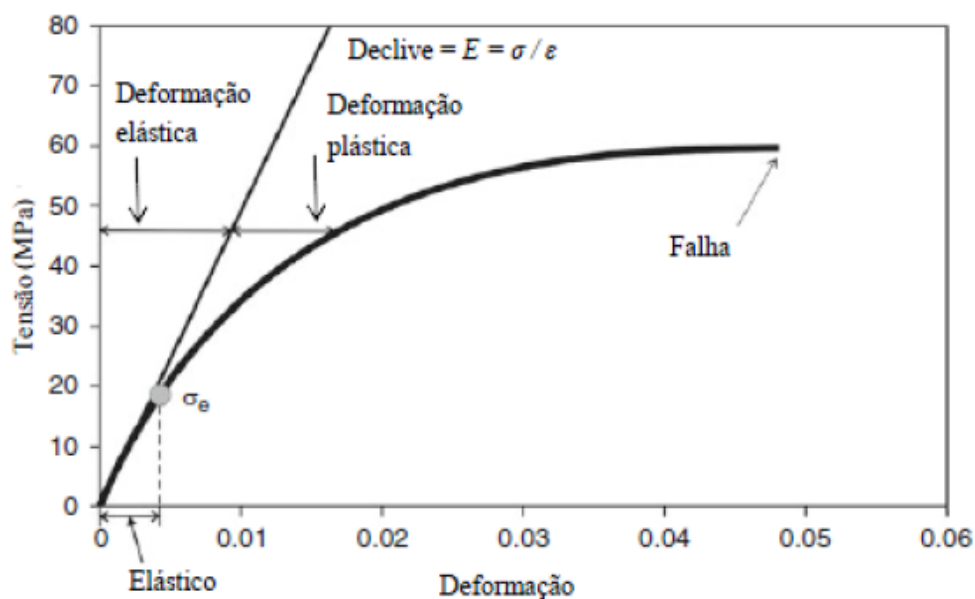


Figura 32 - Típica curva tensão-deformação de um adesivo [23]

- **Ensaio Iosipescu (*V-Notched Beam*)**

Originalmente proposto por Iosipescu [38] para testar ao corte metais soldados, este ensaio tem sido usado para testar compósitos e também adesivos, tanto maciços como em junta [39], seguindo a norma ASTM D3579.

O provete apresenta uma geometria retangular, como se pode ver na (Figura 33), com dois entalhes em V no centro. A carga é aplicada em quatro pontos e são aplicados de forma um momento fletor de valor 0 e assim criar uma área de corte linear entre os entalhes.

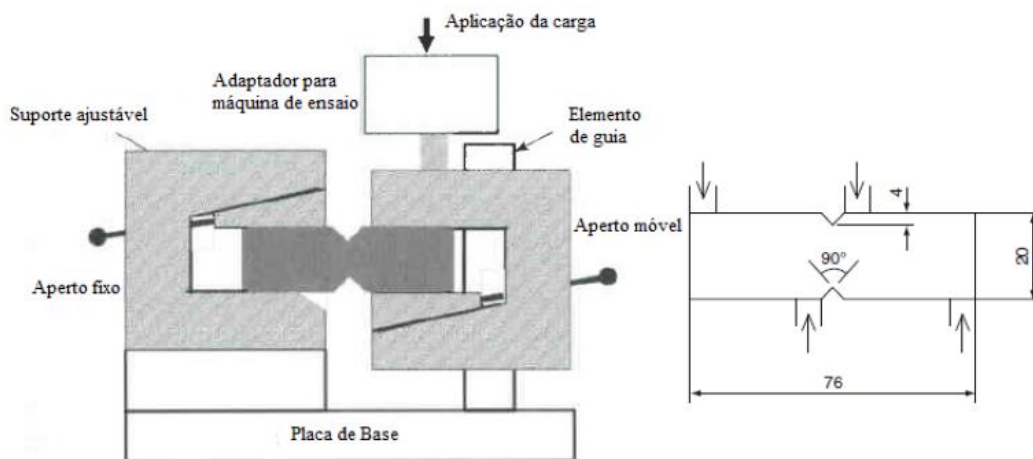


Figura 33 – Ensaio Iosipescu e geometria do provete usado [23]

Normalmente, um provete maciço de adesivo deve ter no mínimo 4 mm de largura, e os efeitos do aquecimento exotérmico durante a cura precisam de ser considerados quando se prepara provetes muito finos [23]. Já os provetes em junta podem ser mais largos, já que normalmente são usados aderentes com 20 mm de largura [39, 40], uma vez que o aquecimento exotérmico é menos preocupante com aderentes metálicos e camadas adesivas finas [23].

- **Ensaio Arcan (*V-Notched Plate*)**

É um teste muito versátil que pode ser usado para medir a tensão de corte de plásticos, compósitos e adesivos. Tem também a vantagem de com o mesmo dispositivo poder testar tanto adesivos maciços como em junta.

O provete é conhecido como “borboleta” por causa do seu formato (Figura 34).

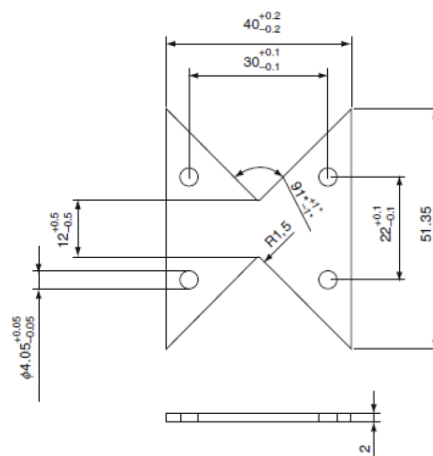


Figura 34 - Geometria e dimensões (em mm) de um provete usado no teste Arcan [34]

Deve haver um bom acabamento nos entalhes e bases, e deve ter uma espessura constante para evitar que dobre ou torça durante o teste [23].

Os suportes semicirculares de metal têm no centro um conjunto de entalhes para fixar o provete ao dispositivo e um outro conjunto de entalhes no exterior para ligar o dispositivo à máquina de teste. A Figura 35 mostra o esquema de um teste para medir as propriedades ao corte.

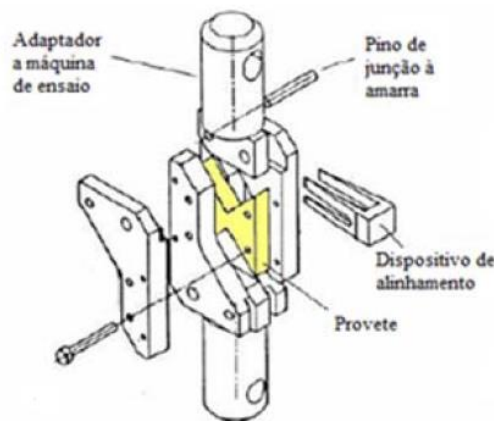


Figura 35 - Fixação do provete no teste Arcan [23]

A configuração do teste apresenta dois entalhes simétricos orientados a -45° e $+45^\circ$ com a direção da carga (Figura 36). É de norma usar um raio de concordância entre os entalhes para diminuir a concentração de tensão provocada por eles [23].

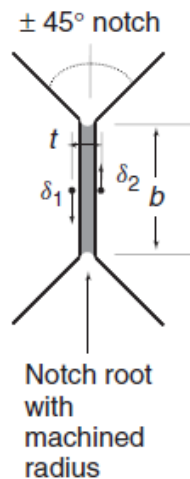


Figura 36 - Zona crítica de um provete usado no teste Arcan [23]

2.2.3 Ensaios de adesivo em junta

Sendo que na vida real os adesivos serão usados numa junta, servindo para unir substratos, os ensaios em junta são os mais aproximados das condições de serviço. Estes

testes já incluem o adesivo como parte de uma estrutura que também é constituída pelos substratos e pela região de interfase. Há, porém, outras diferenças entre os testes com adesivos maciços e os testes em junta. O processo de cura é feito sobre diferentes condições, o que leva a que o adesivo ganhe diferentes propriedades. As propriedades do adesivo também são influenciadas pela presença dos substratos, o que pode limitar o tamanho da zona de deformação plástica na zona de rotura e assim reduzir a resistência da junta. Outro fator determinante nos testes em junta é os diferentes caminhos que a fenda pode tomar. Como mostrado anteriormente, a rotura pode ser coesiva e ocorrer ao longo do centro do adesivo ou então perto da zona de interface, e pode ocorrer mesmo na zona de interface [2]. As diferentes configurações em que ocorre a fratura influencia a resistência da junta, o que torna estes testes e a sua interpretação mais complexas do que os testes com adesivos maciços [2].

Juntas topo-a-topo

É um teste comum com o objetivo de determinar a resistência à tração de uma junta adesiva [41, 42], é um ensaio normalizado e segue a norma ASTM D 897 [42]. É também usado para determinar o módulo de elasticidade do adesivo em serviço [2]. Para garantir bons resultados há três principais cuidados a ter na execução e preparação do ensaio: a camada de adesivo deve ser colocada de forma a evitar que tenha demasiados vazios, a carga deve ser aplicada axissimetricamente e perpendicularmente à camada do adesivo e deve ser evitada a fratura da camada secundária de adesivo nas amostras que tenham camada secundária.

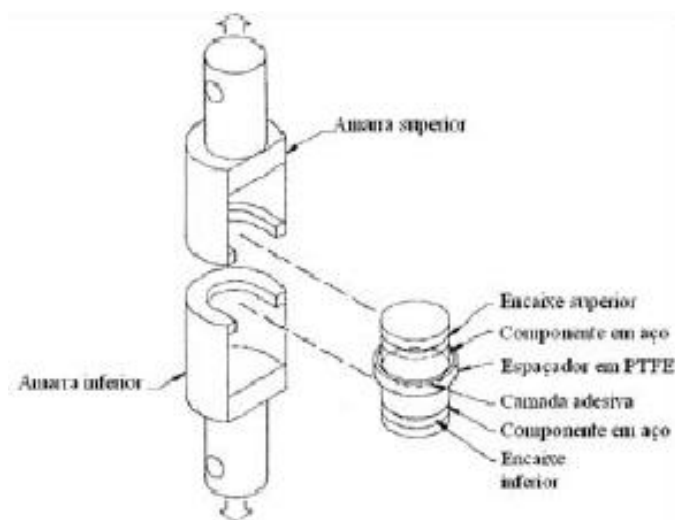


Figura 37 - Aparelho típico do ensaio à tração Topo-a-topo [2]

O aparelho de teste consiste em dois aderentes de metal cilíndricos colados pela camada de adesivo (Figura 37). Para testar a colagem de materiais não metálicos é necessária uma configuração diferente, em que os discos de material não metálico são colados ao cilindro metálico, formando uma camada secundária de adesivo, e depois os discos são

colados um ao outro, o que forma a camada principal de adesivo. Devido à maior resistência das ligações metálicas em relação às ligações não metálicas, fica quase garantido que a fratura irá ocorrer na camada principal.

Juntas de torção topo-a-topo (*Napkin-ring test*)

Este ensaio pode ser usado para determinar a curva tensão-deformação ao corte em adesivos estruturais [2]. São aplicados momentos de valor igual, mas em sentidos opostos, o que solicita o adesivo a uma tensão de corte puro. A máxima tensão de corte é atingida no raio externo do cilindro e é obtida pela formula (1):

$$\tau = \frac{Tr_0}{J} \quad (1)$$

O módulo de elasticidade ao corte é dado pela equação (2):

$$G = \frac{t_A}{J} \left(\frac{T}{\delta} \right); \quad (2)$$

sendo J o módulo de torção, T o momento imposto, r_0 o raio externo, t_A a espessura da camada do adesivo e T/δ é o gradiente medido da curva tensão/deformação. O ensaio segue a norma ASTM E 229, embora a norma esteja a ser revista devido aos maus resultados obtidos tendo como problema a geometria do provete [2] (Figura 38).

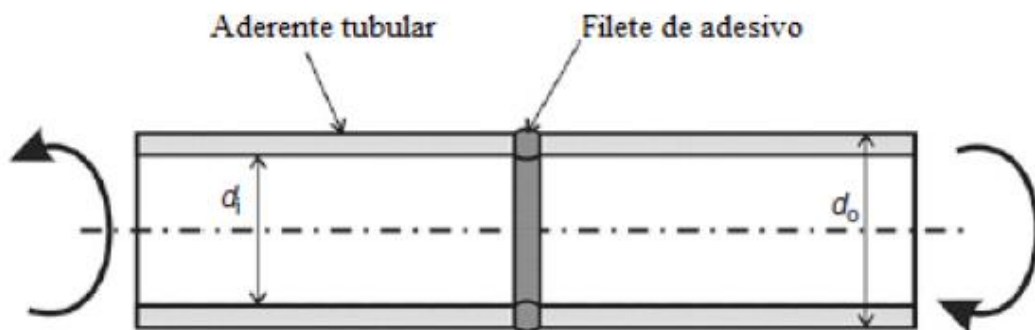


Figura 38 - Geometria de um ensaio *Napkin-ring* [34]

Foi comprovado que a introdução de um filete reduz as tensões de corte na aresta exterior no plano médio do adesivo, mas aumenta as tensões de corte na interface entre o aderente e o adesivo [43]. Deve ser evitado o excesso de adesivo nas bordas, para que não sejam adulterados os valores obtidos no ensaio [2]. O ensaio *Napkin* é viável se $r_0 \approx r_i$, neste caso todo o adesivo sofre aproximadamente a mesma tensão de corte [2].

Ensaio ao corte com aderentes espessos (TAST)

É um ensaio que solicita o adesivo ao corte, seguindo a norma ISO 11003-2.

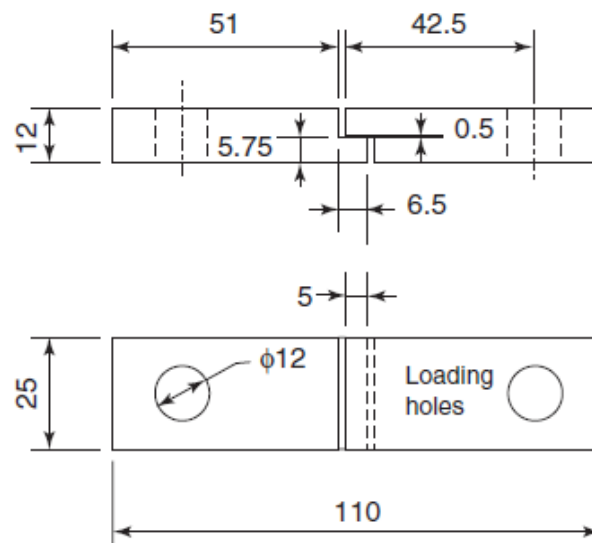


Figura 39 - Geometria de um provete usado no ensaio TAST sob a norma ISO 110033-2 [2]

Esta geometria (Figura 39) garante uma quase uniforme distribuição de tensões no adesivo. Contudo, registam-se mesmo assim algumas concentrações de tensão principalmente nas bordas [2]. Foram propostas geometrias alternativas que reduzem este aspeto, mas necessitam de uma maquinagem relativamente cara. Outra alternativa é usar um filete, que reduz a concentração de tensões e assim evita a rotura prematura e permite determinar o valor máximo da curva $P-\delta$ [2].

De forma a garantir um perfeito alinhamento e evitar que haja algum dobramento dos aderentes, os aderentes são carregados através de pinos perfeitamente alinhados (Figura 40).

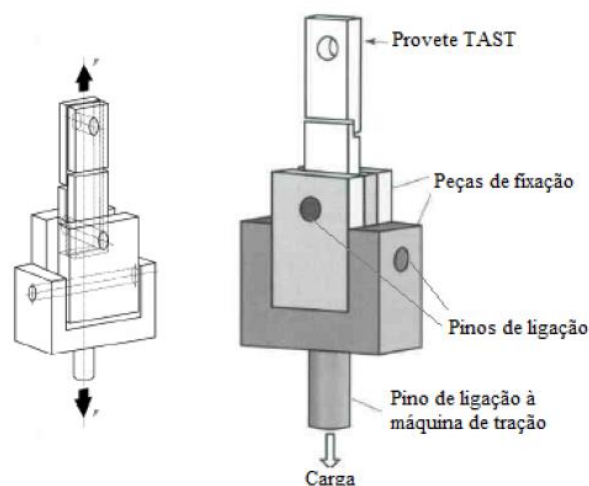


Figura 40 - Esquema de montagem de um aparelho TAST com um conjunto de pinos [2]

Para a medição do deslocamento podem ser usados extensômetros ou convencionais medidores de grampo convencionais. No entanto, a melhor solução é medir o deslocamento usando métodos óticos, porque estes fornecem diretamente a deformação do adesivo e não interferem com o seu comportamento.

Juntas de sobreposição simples

Este tipo de junta é bastante usado na indústria porque reproduz o formato de juntas usadas nas construções aeronáuticas, que foi a área pioneira no desenvolvimento da tecnologia dos adesivos [2]. É um ensaio simples e barato que solicita o adesivo ao corte e segue as normas ASTM D 1002 (Figura 41), e ISO 4587.

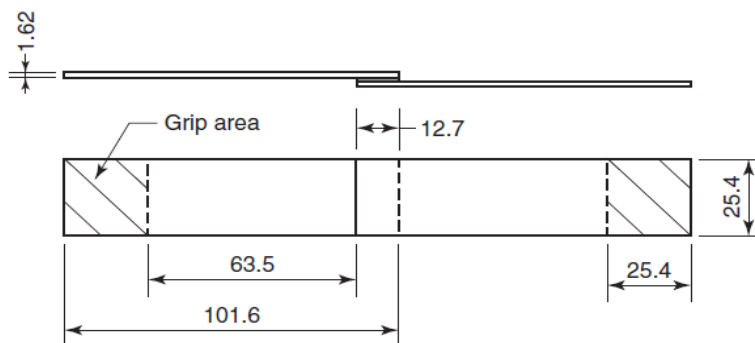


Figura 41 - Dimensões dos provetes usados num ensaio de sobreposição simples segundo a norma ASTM D 1002 [2]

A distribuição de tensão neste ensaio não é uniforme (Figura 42), havendo uma concentração de tensão maior nas bordas da zona sobreposta devido à maior deformação sofrida pelos aderentes nessa zona.

(a)



(b)

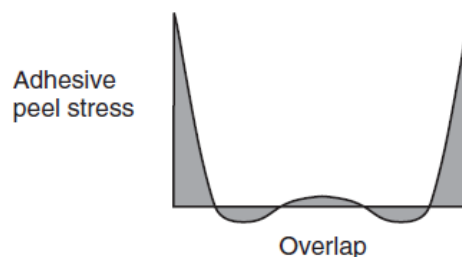


Figura 42 - a) Distribuição de tensão de corte e b) Distribuição da tensão de arrancamento em juntas de sobreposição simples [2]

Testes de arrancamento em juntas em T

Visto que os adesivos são particularmente fracos ao arrancamento, os testes que medem a resistência ao arrancamento são muito importantes [1]. Um dos mais comuns destes testes é o teste em junta em T [1]. Este teste que visa determinar a resistência ao arrancamento do adesivo e é normalizado pela ASTM D1876.

Os provetes são constituídos por dois substratos flexíveis, colados em forma de T (Figura 43), e que podem ou não ser do mesmo material [2]. O teste consiste em separar os aderentes [1].

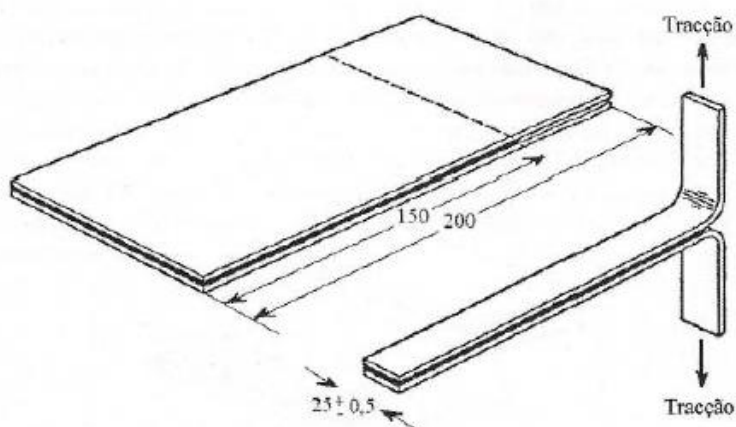


Figura 43 – Provede para teste de arrancamento em T [2]

Se a carga permanecer simétrica ambos os ângulos de arrancamento serão de 90° [2].

2.3 Ensaios de caracterização à fratura

Dado o aumento do uso de adesivos estruturais é importante estudá-los de forma a prever a sua resistência e garantir o seu melhor desempenho. As ligações adesivas contêm defeitos inerentes à sua construção, e a propagação de fendas parte destes defeitos e leva à rotura da junta [21]. É essencial existir uma forma precisa de prever a resistência de uma junta adesiva para baixar os custos dos testes efetuados durante o projeto [21]. Para isso foram desenvolvidos vários ensaios.

Com estes ensaios é possível estudar a resistência de uma junta à propagação de uma fenda, ou seja, obter a tenacidade da junta. São possíveis diferentes comportamentos da junta (Figura 44), com a abertura dos provetes (modo I), corte no plano da fratura (modo II), corte transversal ao plano de fratura (modo III) e (modo misto).

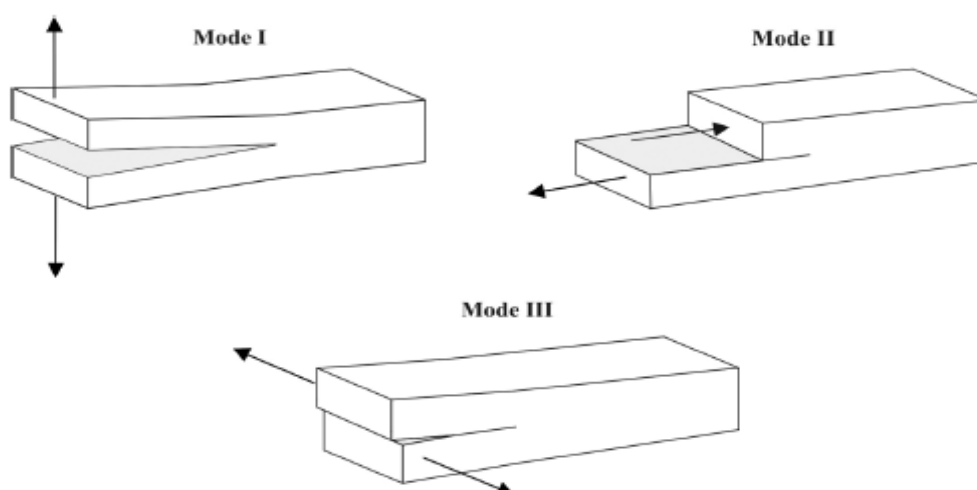


Figura 44 - Modos de fratura [44]

Os testes desenvolvidos para a caracterização da fratura em juntas adesivas normalmente baseiam-se nos conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE), que impõem a restrição que a deformação dos substratos se mantem linear elástica e que qualquer plasticidade é limitada a uma pequena região na frente da fenda [2]. Esta teoria foi primeiramente desenvolvida em materiais de engenharia por Griffith e Irwin, e em polímeros por Williams. Contudo, continua a existir a falta de critérios confiáveis, limitando assim, uma aplicação mais geral das juntas adesivas em aplicações estruturais [21].

Griffith propôs que a energia necessária para fazer crescer uma fenda deve ser equilibrada por uma diminuição da energia elástica do material. A fratura ocorre quando é atingido o valor necessário de energia elástica para propagar uma fenda pré-existente [23].

Em materiais dúcteis a energia dissipada na fratura ultrapassa o valor de energia elástica do material, sendo assim, a zona plástica torna-se significativa na dissipação da energia de deformação nos adesivos estruturais [23]. Os trabalhos de Irwin têm em vista ter em conta este fator.

2.3.1 Modo I

Neste modo a junta é submetida a forças que provocam a abertura dos provetes e fazem propagar uma fenda na direção perpendicular ao plano da carga. Testes em modo I são particularmente interessantes porque são provavelmente os mais simples de executar e porque é de opinião comum que as fraturas que ocorrem em modo I terão lugar sob menores taxas de libertação de energia [23]. O teste mais usado e bem aceite neste modo é o *Double-Cantilever Beam* (DCB) [2, 23].

DCB

É descrito pelas normas ASTM 1990 [45] e ISO 2009 [46]. Este teste permite determinar a taxa crítica de libertação de energia de deformação de modo I, G_{IC} , usando a teoria das vigas corrigida.

O provete usado é relativamente simples de fabricar, é constituído por dois aderentes retangulares com as mesmas dimensões colados por uma fina camada de adesivo com uma pré fenda, a_0 , numa das extremidades (Figura 45). O carregamento é imposto de forma a carregar o provete em Modo I.

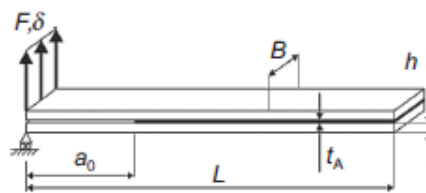


Figura 45 – Geometria e dimensões do provete DCB [47]

Durante o ensaio é obtida a curva força-deslocamento e para análise dos resultados é necessária a medição do comprimento da fenda ao longo do ensaio (Figura 46).

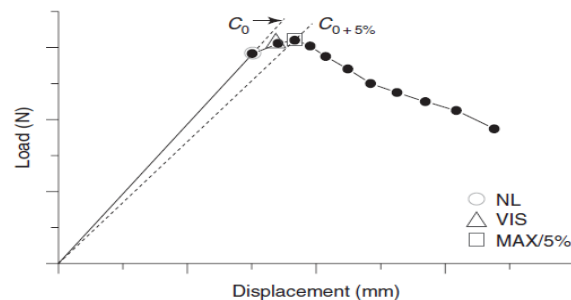


Figura 46 - Curva força-deslocamento típica do ensaio DCB [23]

TDCB

Uma alternativa ao ensaio DCB é o teste *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB). O teste é normalizado pela ASTM D3433 e é idêntico ao DCB, os aderentes são na mesma simétricos, mas, entretanto, não apresentam uma espessura constante em toda a sua extensão. Este ensaio foi desenvolvido de forma a que não seja necessária a medição do comprimento de fenda ao longo do ensaio. Outra vantagem em relação ao ensaio DCB é que a crescente espessura proporciona uma maior resistência à deformação plástica dos aderentes [2]. Porém, a geometria mais complexa dos aderentes faz com que seja significativamente mais caro fabricar os provetes TDCB, comparativamente aos provetes DCB (Figura 47).

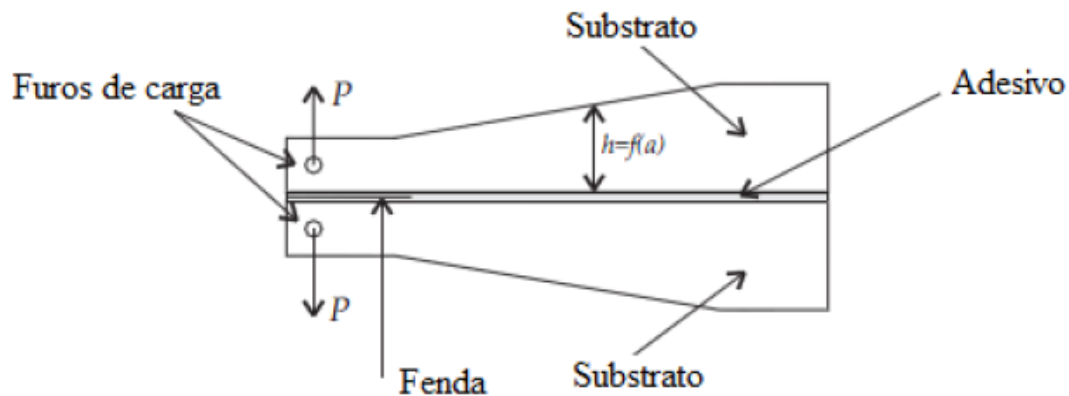


Figura 47 - Geometria provete TDCB [23]

Os provetes apresentam espessura constante nas extremidades, mas na zona intermédia são fabricados de forma a que o fator m se mantenha constante e satisfaça a equação (3):

$$m = \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \quad (3)$$

2.3.2 Modo II

Para estudar as juntas quando submetidas a esforços de Modo II, corte puro, foram desenvolvidos vários testes, entre eles o *End-Notched Flexure* (ENF) e o *End-Loaded Split* (ELS) que são os mais populares, mas até aos dias de hoje nenhum provou ser suficientemente preciso [2]. Um dos problemas comum aos testes deste modo é a medição da propagação da fenda, que se torna difícil porque não ocorre a abertura do provete. Por outro lado, a fratura ao corte normalmente propaga-se de uma forma complexa, frequentemente seguindo um mecanismo de microfratura [2, 23]. Embora não haja qualquer teste em Modo II normalizado para adesivos, há algumas normas do teste ENF aplicadas a materiais compósitos que têm sido adaptadas a adesivos com sucesso [23].

ENF

É o mais simples e mais usado dos testes de caracterização em Modo II. Contudo, podem haver alguns problemas relacionados com propagação instável da fenda [23].

O esquema do teste é similar ao teste DCB, contudo a carga é imposta a meio vão e os aderentes simplesmente apoiados nas extremidades, o que irá causar tensões de corte no adesivo (Figura 48).

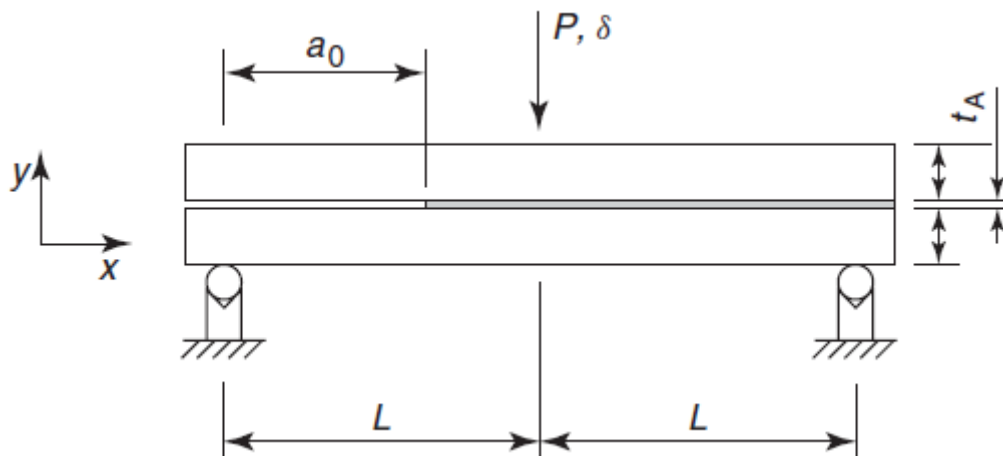


Figura 48 – Geometria e dimensões do provete ENF [23]

ELS

O teste ELS foi desenvolvido de forma a resolver o problema do teste ENF provocando uma propagação de fenda estável. Contudo, envolve apertar o provete numa plataforma linear com rolamentos, livre de se mover horizontalmente [2] (Figura 49). Devido às diferentes condições de aperto entre provetes, introduz-se uma fonte de variação de resultados sendo que carece de correção posterior [23]. Outro problema prende-se com a elevada deformação transversal dos provetes durante a propagação da fratura, o que torna o tratamento de dados mais complexo [23].

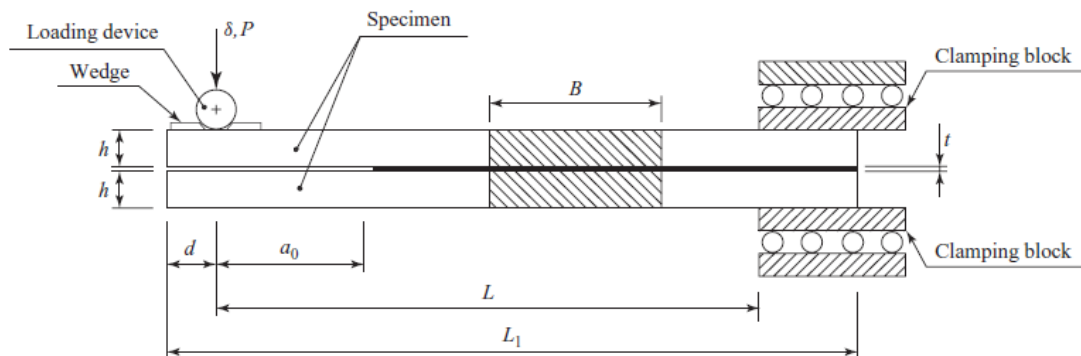


Figura 49 – Geometria e dimensões do provete ELS [23]

Four-Point End-Notched Flexure (4ENF)

O ensaio 4ENF é uma versão do ensaio ENF em que a propagação da fratura ocorre sob uma condição de deslocamento constante da linha de carregamento, o que assegura o crescimento estável da fenda [23]. Contudo, para além de um *setup* mais complexo o teste 4ENF necessita de valores de carga mais elevados porque as forças de fricção que atuam nas faces da superfície da fratura em propagação serão superiores às registadas

no ensaio ENF [2]. À medida que é gasto trabalho contra as forças de fricção provocadas pelas tensões de corte entre os substratos, isso leva ao aumento do valor “aparente” da energia de deformação libertada, G_{IIC} [2].

Neste ensaio o provete é carregado por dois cilindros ligados a uma placa de carregamento sem geração de momentos para que haja uma distribuição uniforme da carga nos dois cilindros [23] (Figura 50).

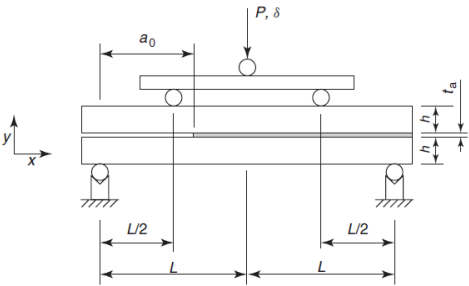


Figura 50 – Geometria e dimensões do provete 4ENF [23]

2.3.3 Modo misto I + II

Em aplicações reais as juntas adesivas são muitas vezes carregadas sob condições de modo misto [48]. As juntas adesivas usam juntas de sobreposição simples, por exemplo, impõem cargas de modo misto no adesivo [48]. Outro exemplo são os materiais anisotrópicos ou laminados que tendem a forçar a fratura a propagar por vários planos preferenciais [23].

Existem vários testes desenvolvidos para testar as juntas adesivas em modo misto (Tabela 5). São testes similares aos de modo I e II, diferindo na forma em como é aplicada a carga ou na simetria/assimetria dos provetes de forma a combinar ambos os modos. Alguns destes testes permitem variar o rácio entre o modo I e II e assim estudar a influência deste rácio na resistência da junta. Pelos resultados obtidos, normalmente, observa-se que a resistência à fratura aumenta com a percentagem de modo II [2].

Tabela 5 - Testes de modo misto e respetivo rácio de modo misto [48]

Type of test	Schematic representation	Degree of mixity, φ (°)
Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB)		$\approx 0-34^\circ$
Single Leg Bending (SLB)		$\approx 41^\circ$
Crack Lap Shear (CLS)		$\approx 49^\circ$
Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam (ATDCB)		$\approx 20^\circ$
Mixed Mode Bending (MMB)		$\varphi = f(c)$
Fixed Rate Mixed Mode (FRMM)		$\approx 41^\circ$

Mixed-Mode Bending (MMB)

O ensaio MMB é normalizado pela ASTM D6671. Este teste é uma combinação do testes em modo I, DCB, e modo II, ENF [23]. A sua grande vantagem em relação aos restantes testes em modo misto é permitir variar o rácio de modo misto quase sem limitações. Isto é possível porque o teste MMB apresenta uma configuração relativamente complexa (Figura 51), em que as duas cargas superiores são aplicadas através de uma alavanca [2].

Neste teste é aplicada uma carga descendente a meio vão de forma idêntica ao teste ENF que provoca o deslizamento entre os aderentes e induz o modo II, e uma carga adicional de tração na extremidade do provete que provoca a abertura do provete e induz o modo I. O rácio de modo misto é obtido variando a relação entre as duas cargas, c .

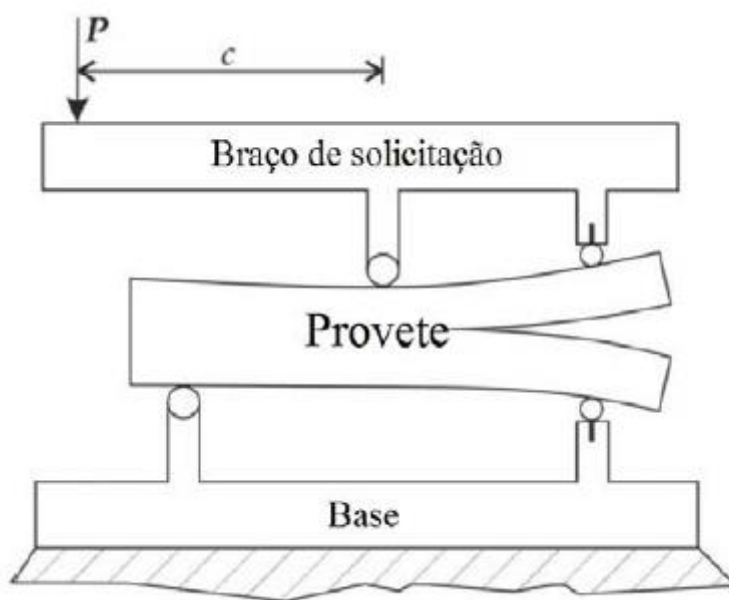


Figura 51 - Configuração do teste MMB [23]

Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)

Tal como o nome indica, o ADCB é uma variação assimétrica do teste DCB. É esta assimetria que provoca o carregamento em carga de modo II em adição ao de modo I.

A assimetria pode ser relativa aos aderentes ou à carga. No primeiro caso a assimetria é induzida pelas diferentes espessuras ou diferentes materiais entre os aderentes (Figura 52). Este caso permite apenas alguma variação do rácio de modo misto, variando a relação entre as espessuras ou rigidez dos aderentes, e apenas na região do envelope de fratura perto do modo I [48].

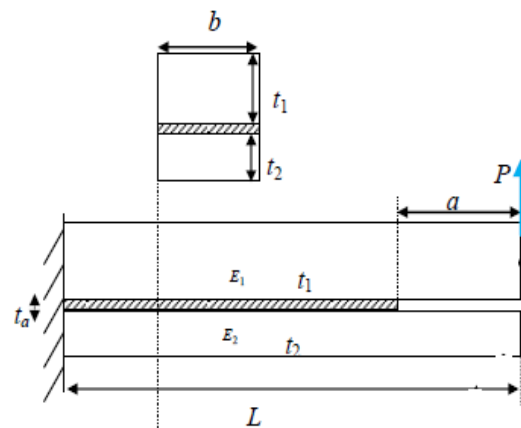


Figura 52 – Geometria e dimensões do provete ADCB [49]

Já no segundo caso a assimetria é provocada pela diferença entre a intensidade ou direção da carga imposta nos aderentes. Este caso permite um maior leque de variações, e assim cobrir praticamente todo o espectro do rácio de modo misto (Figura 53).

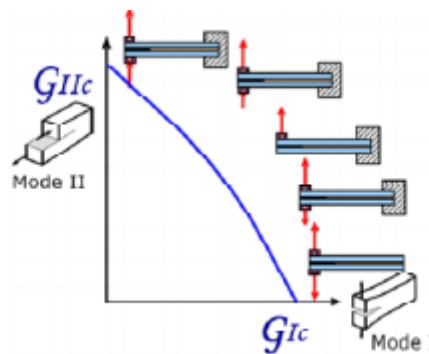


Figura 53 - Espectro de rácio de modo misto atingido com provetes ADCB [50]

ATDCB

O teste ATDCB é relativamente recente [51]. É uma variação do teste TDCB em que apenas um dos aderentes tem o mesmo formato dos aderentes TDCB, enquanto o outro é um aderente DCB (Figura 54). O modo misto varia ligeiramente com o crescimento da fratura [51], sendo que média do rácio de modo misto é de 24° [52]. Tem como principais desvantagens a mais complexa geometria do aderente TDCB e o seu limitado espectro de variação do rácio de modo misto. No entanto, é uma solução útil para caracterizar juntas adesivas sob o modo misto [52].

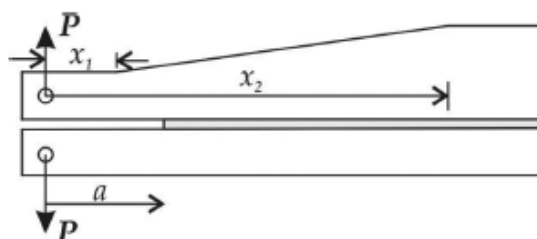


Figura 54 – Geometria do provete ATDCB [52]

Single-Leg Bending (SLB)

O teste SLB é mais um teste que combina os modos I e II. O teste é mais limitado que o MMB em relação à variação possível de rácio de modo misto, mas, no entanto, precisa de menos equipamento e o seu procedimento experimental é relativamente mais fácil [44, 48]. Outra vantagem do teste é que apresenta um excelente compromisso entre a sua simplicidade e o equilíbrio entre as energias dissipadas nos dois modos [48]. Um prolema a evitar é que pode ocorrer a flexão do aderente, especialmente com aderentes mais flexíveis, por isso é aconselhável usar-se roletes em vez de suportes fixos. Desta forma evita-se que os aderentes deslizem e friccionem os suportes, fricção essa que poderia induzir incertezas nos resultados, diminuindo a conformidade do provete em deflexões elevadas [23].

Em que relação ao esquema do teste, é idêntico ao teste ENF, mas o aderente inferior é mais curto e não está apoiado na extremidade em que se encontra a pré-fenda (Figura 55). A diferença na forma em que os aderentes são apoiados e o seu comprimento cria uma deformação diferente entre eles, o que provoca a abertura do provete e induz o modo I em adição ao modo II.

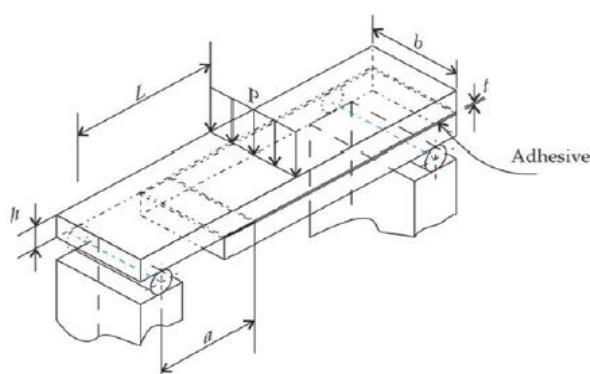


Figura 55 – Geometria e dimensões do provete SLB [44]

Fixed-Ratio Mixed Mode (FRMM)

O teste FRMM tem a vantagem de partilhar com o teste ELS um *setup* igual. Desta forma os laboratórios equipados para executar o ensaio ELS podem também facilmente

executar o teste FRMM [23]. A diferença entre os testes está na forma em que se aplica a carga. Enquanto que no teste ELS a carga é aplicada no aderente inferior de forma a que ambos os aderentes se deformem de forma solidária, no teste FRMM a carga é aplicada no aderente superior, permitindo que o aderente inferior se deforme livremente (Figura 56) [23]. É esta deformação desigual entre aderentes que promove a abertura entre provetes, ou seja, induz o modo I em adição ao modo II.

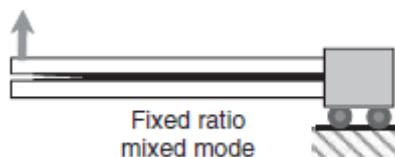


Figura 56 - Esquema do teste FRMM [23]

Cracked-Lap Shear (CLS)

O ensaio CLS é bastante comum para estudar a fratura de juntas adesivas, incluindo sob condições de fadiga [23]. Embora apenas permita um limitado leque de variação de modo misto, este teste providencia formas úteis e convenientes de executar o teste em modo misto em juntas adesivas e consegue cobrir um modesto espectro de variação do rácio de modo misto variando a relação entre a espessura dos aderentes, [23, 48]. Já quando os aderentes são simétricos, o valor nominal global de modo misto aplicado é de aproximadamente 63° [48].

A carga é aplicada na extremidade do aderente superior do lado em que está induzida a pré-fenda [48], como se pode ver na Figura 57.

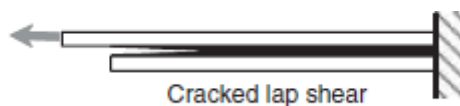


Figura 57- Esquema do ensaio CLS [23]

2.4 Métodos de determinação da tenacidade à fratura

O crescimento do uso de juntas adesivas em aplicações estruturais requer o desenvolvimento de teorias e modelos com um nível de sofisticação cada vez maior, permitindo o melhoramento das características estruturais das juntas adesivas [2].

Uma das características que é mais importante obter e estudar para desenvolver melhores juntas adesivas é a sua tenacidade, ou seja, a sua resistência à propagação de uma fenda. Nos ensaios de fratura, a tenacidade do adesivo é dada pela taxa de libertação de energia de deformação crítica, G_c . O critério energético para previsão do crescimento de fenda é baseado nos trabalhos de Griffith em que se considera que a força motriz do crescimento da fratura é a energia elástica de deformação armazenada que é libertada quando a fenda se propaga sendo que esta energia deve ser no mínimo

tão grande quanto a necessária para criar novas superfícies [53]. Para todos os testes disponíveis para obtenção de G_c , existem métodos de redução que permitem o seu cálculo. De seguida são pormenorizados os modos de obtenção do coeficiente de libertação de energia de deformação, G_c , em relação aos ensaios DCB e ATDCB.

2.4.1 Ensaio *Double-Cantilever Beam*

A análise analítica do ensaio DCB é apoiada em várias teorias, que podem ser divididas em dois grupos, as que precisam de medição do comprimento da fenda durante o ensaio, CCM, CBT e DBT, e as que estimam um comprimento de fenda equivalente, CBBM.

Compliance Calibration Method (CCM)

Segundo a teoria CCM a taxa de libertação de energia pode ser calculada através da equação de Irwin-Kies [54-56]:

$$G_c = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}, \quad (4)$$

onde P é a carga aplicada, B é a largura do aderente, $C = \delta/P$ é a flexibilidade do aderente e a o comprimento da fenda. Para ajustar as curvas $C=f(a)$, é utilizado o polinómio de grau 3 [54]:

$$C = C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a. \quad (5)$$

Substituindo na primeira equação, resulta a equação:

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2B} (3C_3 a^3 + 2C_2 a^2 + C_1 a) \quad (6)$$

Direct Beam Theory (DBT)

Baseado na teoria das vigas elementar, em que se admite que cada braço do provete se comporta como uma viga encastrada e na sua extremidade livre é aplicada uma força, o valor de G_{IC} pode ser obtido pela equação [54, 55]:

$$G_{IC} = \frac{12a^2 P^2}{B^2 h^3 E_1}, \quad (7)$$

onde h é a altura de cada aderente e E_1 o módulo de Young do aderente na direção longitudinal.

Corrected Beam Theory (CBT)

A teoria das vigas elementar não tem em conta nem a rotação nem deflexão da abertura da fenda (Figura 58) [2, 55].

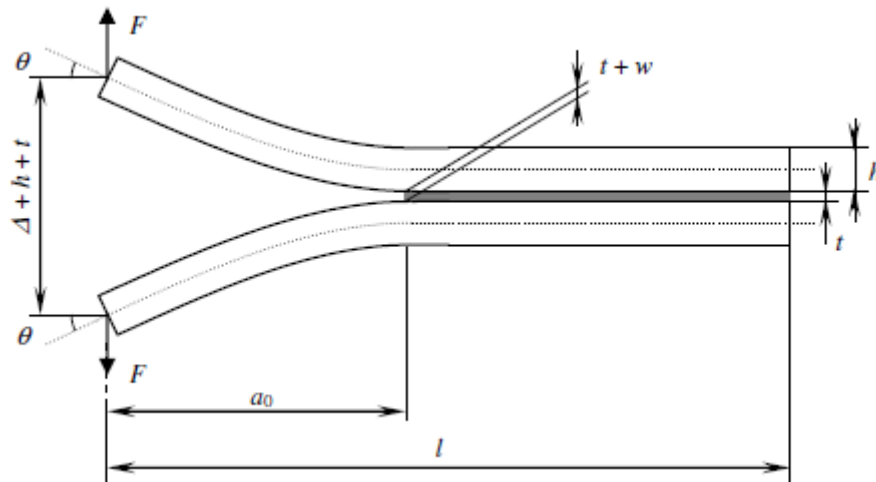


Figura 58 – Rotação e deflexão durante o ensaio DCB [56]

Sendo assim, no CBT o comprimento da fenda é corrigido pela adição de um fator [54, 56]. Assim o valor de G_{IC} é obtido através da pela equação:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)}, \quad (8)$$

onde δ é o deslocamento aplicado.

Para obter o coeficiente de correção do comprimento de fenda usa-se a teoria das vigas que permite que se obtenha a relação entre a flexibilidade e o comprimento de fenda [54] pela equação:

$$C = \frac{8(a + |\Delta|)}{E_1 B h^3}, \quad (9)$$

da qual se obtém a equação (10):

$$C^{\frac{1}{3}} = \frac{2}{h(E_1 B)^{\frac{1}{3}}} (a + |\Delta|). \quad (10)$$

Efetuando a regressão linear de $C^{1/3} = f(a)$ obtém-se o coeficiente de correção de comprimento de fenda [52, 56]. A regressão linear pode ser obtida efetuando o teste com três diferentes comprimentos de fenda iniciais [52], como se pode ver no gráfico da Figura 59.

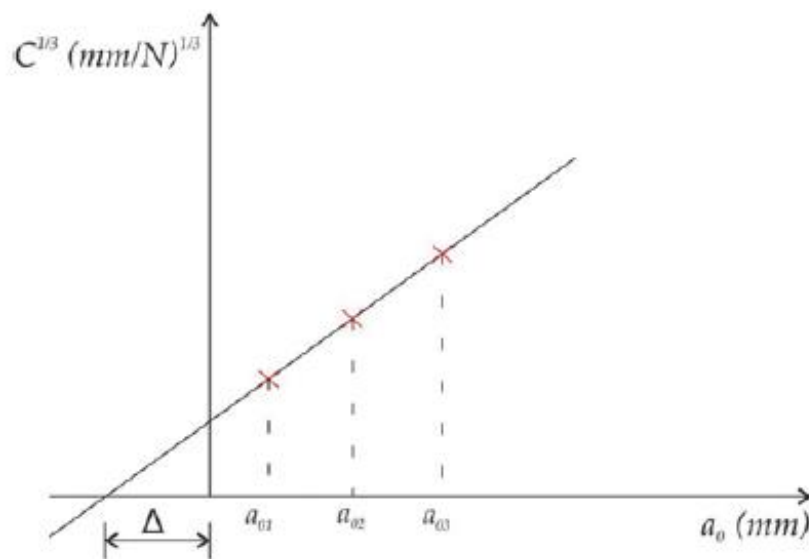


Figura 59 – Método para obter o coeficiente de correção do comprimento de fenda [52]

Outra forma de obter coeficiente de correção de comprimento de fenda é considerando cada aderente como uma viga assente numa fundação elástica, da qual resulta a seguinte equação:

$$\Delta = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{12}} \left[3 - 2 \left(\frac{1,18 \sqrt{E_1 E_2}}{G_{12} + 1,18 \sqrt{E_1 E_2}} \right)^2 \right]} \quad (11)$$

Compliance-Based Beam Method (CBBM)

Esta teoria ao contrário das anteriores, permite calcular G_C sem a medição de a ao longo do ensaio, o que é normalmente difícil de conseguir [54]. Na realidade, é desenvolvida uma zona designada por *Fracture Process Zone* (FPZ), na ponta da fenda, consequência de múltiplas microfraturas através da espessura e plastificação do adesivo [54]. A ilustração deste fenómeno pode ser vista na Figura 60.

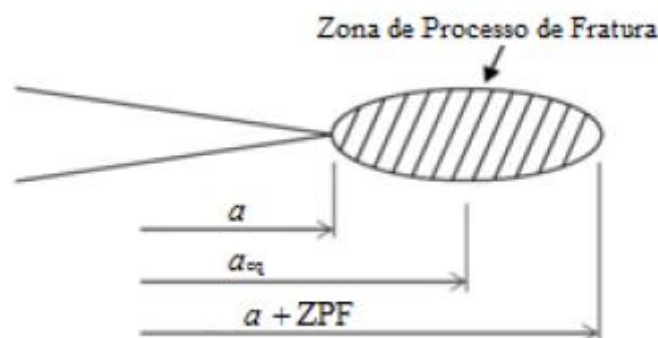


Figura 60 – Ilustração da zona FPZ e conceito de fenda equivalente [54]

Esta teoria é baseada no conceito de fenda equivalente e depende unicamente do comportamento do provete durante o ensaio [54]. A energia de deformação devido à flexão e incluindo os efeitos de corte é obtida pela equação:

$$U = 2 \left[\int_0^a \frac{M_f^2}{2E_1 I} dx + \int_0^a \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{\tau^2}{2G_{13}} B dz dx \right], \quad (12)$$

onde M_f representa o momento de flexão, I o momento de inércia da secção reta de um aderente, E_1 o modulo de Young e G_{13} o modulo de corte. A tensão de corte, τ , é dada pela equação:

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{V}{Bh} \left(1 - \frac{z^2}{d^2} \right), \quad (13)$$

onde d e V representam, respetivamente, metade da espessura e a carga transversal em cada aderente e z a cota no sentido z .

Através do teorema de Castigliano obtém-se a deformação da seguinte forma:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{E_1 Bh^3} + \frac{12Pa}{5BhG_{13}}. \quad (14)$$

Este teorema é baseado na teoria das vigas e permite definir a flexibilidade do provete, $C = \delta/P$, através da curva P/δ . Contudo, a teoria das vigas não tem em conta todos os fenómenos que influenciam a curva P/δ . De facto, existem concentrações de tensões na frente da fenda durante o início da parte elástica da curva P/δ que, por exemplo, não são tidas em conta pela teoria das vigas [54].

Para incluir estes efeitos, o valor de E_1 deve ser substituído por um modulo de flexão corrigido, E_f , que pode ser obtido através da equação (15) utilizando valor medido da flexibilidade inicial:

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a + |\Delta|)}{5BhG_{13}} \right)^{-1} \frac{8(a + |\Delta|)^3}{Bh^3}. \quad (15)$$

Para ter em conta os efeitos da FPZ na frente da fenda, deve ser considerado um a equivalente obtido em função da flexibilidade do provete registada durante o ensaio e considerando $a_{eq} = a + |\Delta|$ em vez de a [54].

Sendo assim, G_{1c} pode ser obtido pela equação (16):

$$G_{1c} = \frac{6P^2}{B^2} \left(\frac{2a_{eq}^2}{h^2 E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right). \quad (16)$$

Método integral J

O integral J foi desenvolvido baseado nos conceitos de forças energéticas [56]. Tem a vantagem de em certas condições não ser necessária a medição do comprimento da fenda durante o ensaio [56]. Foi demonstrado que o valor do Integral de J é igual ao valor de energia libertada por materiais não lineares no domínio elástico contendo uma fratura [53]. Em duas dimensões o integral J é obtido por (17):

$$J = \int_s \left(W dy - \psi \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \partial s \right), \quad (17)$$

onde W é a densidade de energia de deformação, u define a deformação e ψ é o vetor de tração na área que circunda a frente da fenda.

Assumindo que o integral J dá uma medida de G_{IC} , chega-se a seguinte expressão para o provete DCB:

$$G_{IC} = 12 \frac{(P_u a)^2}{E h^3} + P_u \theta_0 \cdot ou \cdot G_{IC} = P_u \theta_p, \quad (18)$$

onde P_u representa a carga aplicada por unidade de largura dos aderentes, θ_0 a rotação relativa do aderente na frente da fratura e θ_p a rotação relativa dos aderentes no ponto de aplicação da carga (Figura 61).

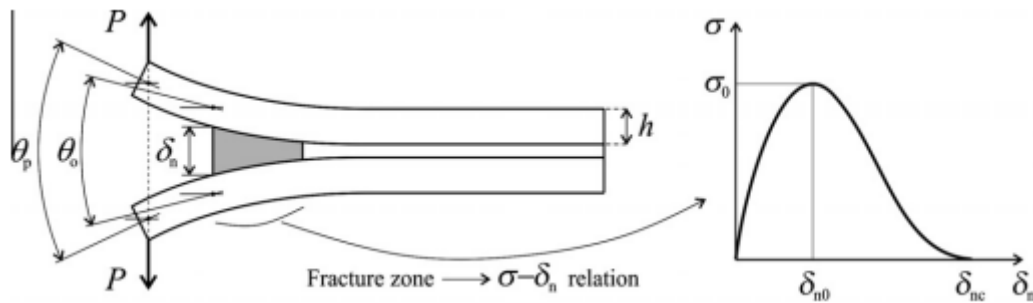


Figura 61 – Descrição dos parâmetros de análise do ensaio DCB [57]

O integral J pode ser calculado ao longo de um caminho arbitrário circundante à frente da fenda por:

$$G_n = \int_0^{\delta_{nc}} t_n(\delta_n) d\delta_n, \quad (19)$$

onde δ_n representa o deslocamento dos aderentes no início da propagação da fenda e t_n é a tensão de tração. A curva $t_n(\delta_n)$ pode ser obtida pela equação (20) em ordem a δ_n :

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_{IC}}{\partial \delta_n} \quad (20)$$

Assim, durante o ensaio devem ser medidos os valores de P , a , δ_n e θ_0 [57].

2.4.2 Ensaio Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam

O método de obtenção da taxa de libertação de energia de deformação do ensaio ATDCB é baseado na teoria das vigas considerando um sistema equivalente, como pode ser visto na Figura 62 [52].

Segundo este sistema a flexibilidade do provete é dada pela equação (21):

$$C_{\text{total}} = C_{\text{DCB}} + C_{\text{TDCB}} , \quad (21)$$

onde C_{DCB} e C_{TDCB} são os valores de flexibilidade do aderente DCB e do aderente TDCB, respetivamente. A energia libertada no ensaio ATDCB é dada por metade de G_T :

$$G_c = \frac{1}{2} \left[\frac{P^2}{2b} \frac{d(C_{\text{DCB}})}{da} + \frac{P^2}{2b} \frac{d(C_{\text{TDCB}})}{da} \right] = \frac{1}{2} (G_{\text{DCB}} + G_{\text{TDCB}}) \quad (22)$$

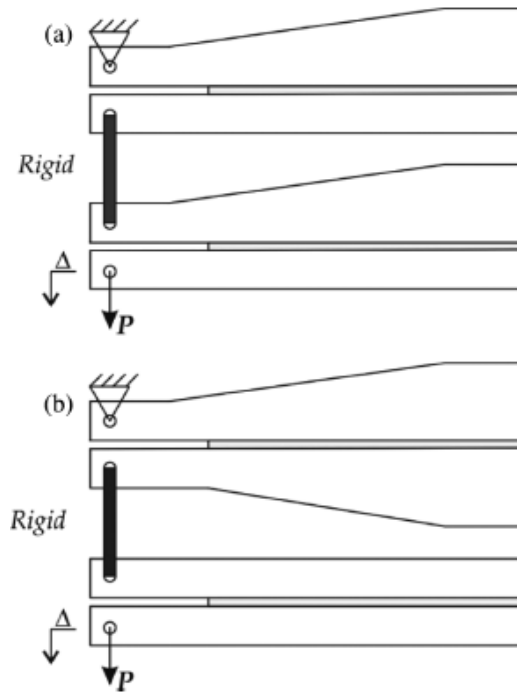


Figura 62 – Sistema equivalente para análise do ensaio ATDCB [52]

A equação (22) é aplicável se a camada de adesivo se mantiver perpendicular a direção da carga durante o teste, como se pode ver na Figura 62, devido à simetria do material de ambos os aderentes [58]. Os valores de flexibilidade dos provetes DCB e TDCB podem ser obtidos pelas equações (23) e (24), respetivamente:

$$G_{DCB} = \frac{4P^2(3a^2 + h^2)}{Eb^2h^3} \quad (23)$$

$$G_{TDCB} = \frac{4P^2}{Eb^2}m, \quad (24)$$

sendo m o declive da construção do provete TDCB. O rácio de modo misto varia ligeiramente com o início da propagação da fenda, o que pode ser explicado pela geometria em cunha do provete TDCB que provoca mudanças na rigidez relativa dos dois aderentes durante a propagação da fenda [52]. O valor médio de rácio de modo misto obtido é de 24° [44]. A divisão de modos pode ser obtida resolvendo o sistema de equações (25):

$$\begin{cases} \theta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}} = 24^\circ \\ G_c = G_I + G_{II} \end{cases} \quad (25)$$

Consequentemente, G_I e G_{II} são obtidos pelo sistema (26):

$$\begin{cases} G_I = \frac{G_c}{1 + \tan^2 24^\circ} \\ G_{II} = G_c - G_I \end{cases} \quad (26)$$

2.5 Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo (MDC) têm vindo a ser usados nas ultimas décadas para prever a resistência de juntas adesivas. Estes modelos permitem a simulação do crescimento da fratura dentro de regiões maciças de materiais contínuos ou na interface entre diferentes materiais [59, 60]. Comparados com o convencional métodos de elementos finitos, são capaz de obter previsões muito mais precisas, visto que podem ser desenvolvidas diferentes formas para as leis coesivas, dependendo da natureza do material ou da interface a serem simulados [61]. Os MDC são baseados em elementos de mola ou, mais tipicamente, em elementos coesivos [59], unindo elementos estruturais a duas dimensões (2D) ou três dimensões (3D).

Comparado com mecânica dos meios contínuos, os MDC são independentes da malha usada, se houver suficientes pontos de integração simultaneamente sob amaciamento durante o processo de fratura [62, 63]. Esta técnica permite combinar múltiplas possibilidades de fratura, e não é necessário o conhecimento do estado de deformação inicial, uma vez que os danos se iniciam em qualquer dos elementos coesivos quando o critério de iniciação de dano for atingido [61].

A principal limitação dos MDC é que os elementos coesivos devem ser colocados nos planos onde a deformação é propensa a ocorrer, o que, em muitas aplicações, pode ser difícil de saber antecipadamente [61]. Contudo, em ligações adesivas a propagação da fratura é restrita à camada adesiva ou à interface, o que facilita o procedimento de análise [61].

2.5.1 Leis de dano coesivo

As leis de dano coesivo são estabelecidas entre pares de nós de elementos coesivos, e podem ser aplicadas seguindo duas abordagens, pela aproximação local ou contínua.

A abordagem pela aproximação local permite unir nós sobrepostos de elementos representativos de diferentes materiais ou diferentes camadas em materiais compósitos, para simular uma interface de espessura zero (Figura 63). Nesta abordagem, as dissipações plásticas da ligação adesiva são simuladas por elementos finitos sólidos, enquanto os elementos coesivos simulam o crescimento da fratura [61].

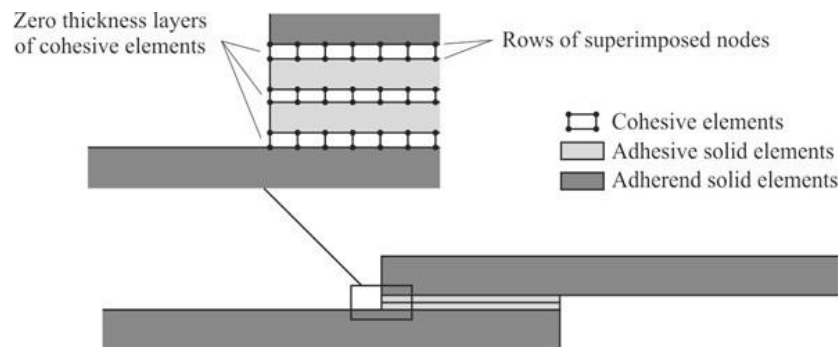


Figura 63 - Elementos coesivos para simular trajetos de fratura em camadas de espessura zero, aproximação local [64]

Já a aproximação contínua permite que as leis de dano coesivo sejam aplicadas diretamente entre dois materiais que não estão em contacto para simular uma fina camada entre eles, e assim simular uma ligação adesiva (Figura 64). Esta abordagem implica a substituição de toda a ligação adesiva por uma única camada de elementos coesivos com um comportamento representativo de uma ligação adesiva [65, 66].

Esta abordagem tem sido amplamente usada na simulação de ligações adesivas, com resultados precisos após as apropriadas calibrações serem executadas para as leis de dano coesivo [67]. A principal desvantagem desta abordagem é que o modelo de dano coesivo se torna dependente da geometria da junta adesiva, mais especificamente da espessura do aderente, t_p , e da espessura do adesivo, t_a , porque estes parâmetros afetam largamente o tamanho da FPZ e a plasticidade na zona à frente da fenda [68].

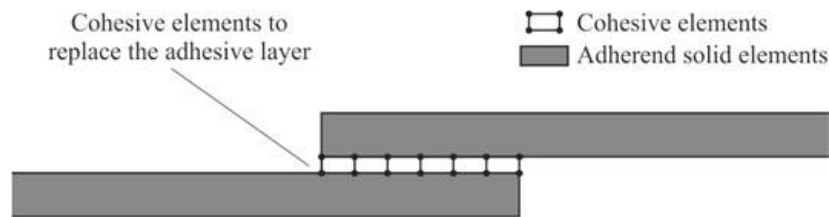


Figura 64 - Modelação de uma fina ligação adesiva entre aderentes, aproximação contínua [69]

Foram desenvolvidos vários modelos de dano coesivo, com distintivas formas, incluindo o modelo triangular [70], linear parabólico [71], polinomial [72], exponencial [73] e trapezoidal [65].

No que toca à escolha da forma mais apropriada a escolher para o modelo de dano coesivo, devem ser o principal fator de decisão, o material ou interface a serem simulados pelo modelo. No entanto, devem ser tidos em conta outros fatores [60]. O formato do modelo de dano coesivo também influencia a procedimento iterativo de resolução e o tempo necessário para obter a solução de um determinado problema: os maiores problemas de convergência normalmente ocorrem mais no modelo trapezoidal do que no triangular, devido à mais abrupta mudança de rigidez nos elementos coesivos durante o amaciamento [61]. Para além disso, os formatos exponencial e trapezoidal são mais difíceis de formular e implementar num *software* de elementos finitos [61].

Os formatos triangular e trapezoidal são os mais usados nos modelos de dano coesivo em aplicações estruturais [61] (Figura 65).

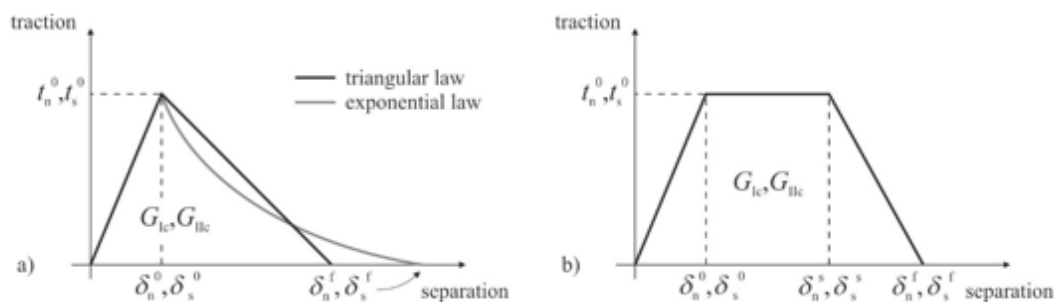


Figura 65 - Diferentes formatos de leis de dano coesivo: a) triangular ou exponencial b) trapezoidal [61]

O formato trapezoidal é o recomendado, para prever a resistência de juntas adesivas, para adesivos dúcteis [59, 74], e esta escolha é particularmente crítica quando se consideram aderentes rígidos, devido à, praticamente, ausência de efeitos de deformação diferencial nestes componentes ao longo da sobreposição [75, 76].

Já a lei de coesiva triangular, por seu lado, é eficiente em materiais frágeis que não plastificam significativamente após o ensaio [62] e também em fraturas interlaminares de aderentes de material compósito em ligações estruturais, devido à sua fragilidade intrínseca [77].

2.5.2 Métodos de determinação dos parâmetros coesivos

Os modelos de dano coesivo são uma excelente técnica para prever a resistência de uma ligação adesiva [61]. Contudo, os parâmetros coesivos de uma determinada aplicação necessitam de um procedimento preciso de calibração sob condições restritas e respetiva validação de forma a simular de forma precisa o processo de fratura [78]. Apesar disto, ainda não estão disponíveis métodos normalizados para a definição dos parâmetros t_n^0 e t_s^0 [79].

Estão atualmente difundidas três técnicas de estimação de parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC}) que diferem significativamente em termos de complexidade e precisão: a técnica de identificação de propriedades, o método inverso e o método direto. Estes métodos normalmente são baseados em provetes DCB, ENF e de sobreposição [56, 80-83].

Técnica de identificação de propriedades

Este método envolve a estimação individual de todos os parâmetros relevantes para o modelo de dano coesivo através dos apropriados testes [61]. De acordo com testes anteriores [84], esta técnica é mais crítica usando testes com adesivos maciços, devido aos conhecidos desvios entre propriedades dos adesivos em provete maciço e em camada fina [61]. Esta diferença ocorre dentro do efeito restritivo dos aderentes na camada adesiva e também à propagação de fratura tipicamente em modo misto em ligações adesivas [61]. Efetivamente, em materiais maciços, a fratura tende a propagar perpendicularmente à direção de tensão principal máxima [85]. Por outro lado, em camada de adesivo, a fenda é forçada a seguir o caminho ao longo do comprimento da ligação, sendo que a fratura é normalmente coesiva ao longo do adesivo [61].

Método inverso

A técnica inversa é baseada numa análise iterativa que tem como objetivo fazer coincidir os resultados obtidos numericamente com os dados obtidos experimentalmente, como por exemplo a curva $P-\delta$, permitindo a determinação inversa das leis de dano coesivo com a forma parametrizada para condições geométricas específicas dos provetes [61]. Tal como na técnica de identificação de propriedades, deve ser inicialmente selecionada uma forma simples para a lei de dano coesivo baseada no já conhecido comportamento do material a ser simulado [67].

Método direto

O método direto permite obter a forma precisa da lei de dano coesivo de um determinado material ou interface [61]. Isto é conseguido estimando inicialmente os fatores G_{IC} e G_{IIC} através de testes de caracterização de fratura até ao início da propagação da fenda, geralmente utilizando métodos baseados no integral-J. De

seguida diferencia-se as curvas $G_I\text{-}\delta_n$ ou $G_{II}\text{-}\delta_s$, o que permite obter as leis de dano coesivo [84].

2.5.3 Modelação numérica de juntas adesivas por modelos de dano coesivo

Alguns investigadores definiram procedimentos para validação dos modelos de dano coesivo comparando os valores obtidos experimentalmente e obtidos numericamente (por análise de MEF), com bons resultados. Alguns desses trabalhos são descritos de seguida.

2.5.3.1 Ensaios de fratura em modo puro

Um ensaio que pode ser tido como exemplo de aplicação dos modelos de dano coesivo em fraturas em modo puro é o trabalho de Campilho [86], que aplicou uma metodologia inversa na definição de uma lei coesiva ao corte através de ensaios ENF (abordagem contínua) utilizando um adesivo epóxico dúctil (Araldite® 2015) com espessura de $t_a=0,2$ mm. Apesar das dificuldades de medição da fenda devido à sua propagação sem abertura [87], a aplicação de um fluido corretor ao longo da fenda permitiu a estimação precisa do comprimento da fenda através de processamento de imagens. O procedimento consistiu em tirar fotos durante o teste com intervalos de 5 segundos com uma câmara digital de 10 MPixel. A correlação entre a curva $P\text{-}\delta$ e tempo decorrido desde o início do teste tornou possível a estimação de G_{IC} . O tempo de ensaio de cada ponto da curva $P\text{-}\delta$ foi calculado através do valor atual de deformação, δ , e o valor da carga. A correspondência em relação ao valor do comprimento de fenda, a , foi obtida pelo conhecimento do tempo de teste de cada imagem. O valor de G_{IC} foi estimado por três métodos: CCM, CBT e CBBM, este último necessitou da medição do comprimento da fenda, a , uma vez que este método calcula G_{IC} apenas através dos resultados experimentais.

O resultado dos três métodos para cinco provetes testados mostrou resultados similares entre o CCM e o CBBM, e valores inferiores usando o CBT. A análise pelo MEF representou fielmente a geometria de cada provete e o comprimento de a_0 . Foi aplicada uma formulação de lei de dano coesivo trapezoidal baseada numa aproximação contínua [88], acoplada ao Abaqus®, para ter em conta a ductilidade do adesivo. Apesar disso, em termos de modelação espacial, os elementos coesivos tinham espessura zero. Na Figura 66 pode-se ver a forma deformada do provete com as condições fronteira e de carregamento aplicadas.

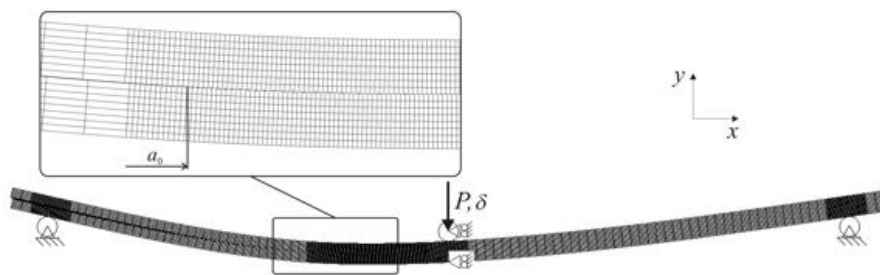


Figura 66 - Forma deformada do provete durante a propagação da fenda, com condições fronteira e de carregamento [86]

Os valores de G_{IC} obtidos com o método CBBM foram usados como valores de entrada nos modelos MEF. Os restantes parâmetros coesivos (t_s^0 e δ_s^s) foram estimados ajustando as curvas P - δ experimentais e numéricas de cada provete, a Figura 67 mostra o resultado de processo de ajuste para um provete.

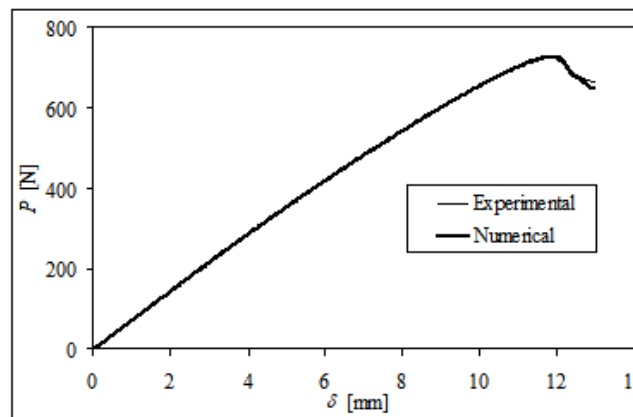


Figura 67 – Comparação das curvas P - δ experimental e MEF de um provete testado [86]

A Figura 68 mostra a lei de dano coesivo de corte média e os respectivos valores de G_{IIC} , t_s^0 , δ_s^s e δ_s^f , e também a extensão das leis de dano coesivo após a aplicação individual dos princípios de modelação inversa a cinco curvas P - δ experimentais.

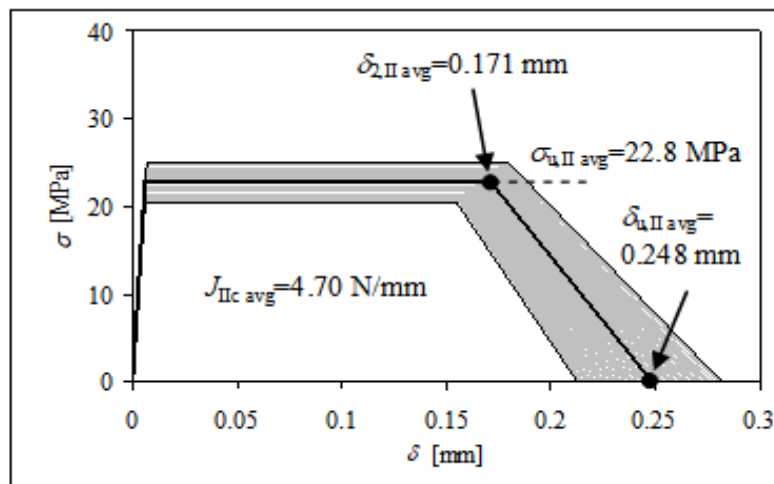


Figura 68 – Lei de dano coesiva de corte média e desvio após aplicação do método inverso a cinco provetes [86]

O ajuste manual permitiu uma visão clara da influência dos parâmetros coesivos nas curvas P - δ numéricas. G_{IIc} , que foi o valor de entrada nas simulações influenciou principalmente o valor máximo de carga. O aumento do parâmetro t_s^0 aumentavam o valor máximo de carga e a rigidez do provete após o pico, levando a uma redução mais abrupta após o pico de carga. Finalmente, δ_s^s desempenhou um importante papel no arredondamento da curva P - δ próximo do valor máximo de P . Estes resultados indicam que existe apenas uma solução possível para lei de dano coesivo de corte do adesivo pelo método inverso.

2.5.3.2 Ensaios de fratura em modo misto

O trabalho de Lee et al. [79], consistiu num procedimento sistemático para estimar os parâmetros locais da lei de dano coesivo de uma ligação adesiva, usando o ensaio de modo-misto SLB com a tração ou o corte como os modos dominantes, para a extrapolação das leis de modo puro, de modo a simplificar a técnica inversa. Os provetes SLB, constituídos por um aderente superior em material compósito reforçado com fibra de carbono e um aderente inferior em aço, foram testados em diferentes modos mistos, alterando a geometria dos provetes para a validação dos dados em condições de tensão e corte puros. Todos os provetes apresentaram uma fratura coesiva. A medição de G_c foi realizada a partir dos resultados do teste, e o rácio de modo misto foi definido pela clássica teoria das vigas. As extrapolações lineares dos resultados medidos de ambos os testes, com tração e corte dominantes, permitiram a definição de G_{IC} e G_{IIc} (Figura 69). A decomposição dos modos resultou em $G_{IC} = 140 \text{ N/m}$ e $G_{IIc} = 280 \text{ N/m}$ para tração e corte puros, respetivamente, valores típicos para matrizes de epóxidos.

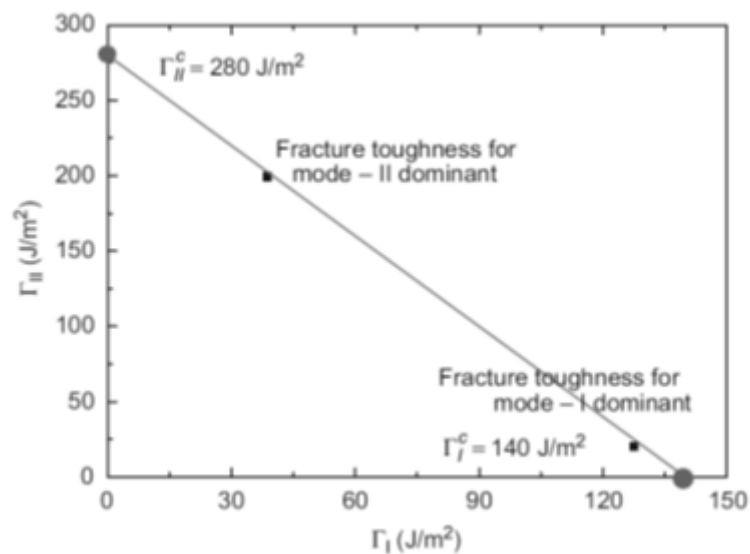


Figura 69 - Extrapolação linear de G_{IC} e G_{IIC} dos resultados do ensaio de modo misto [79]

Foi considerada uma lei de dano coesivo em modo misto para a reprodução dos resultados, construída com a lei de dano coesivo triangular para tração e corte puro. A definição dos parâmetros coesivos em falta (G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 and t_s^0) foi conseguida usando as técnicas *design of experiments* (DOE) e *kringing metamodel* (KM). A técnica KM permitiu obter uma solução otimizada por pela minimização do erro (Figura 70).

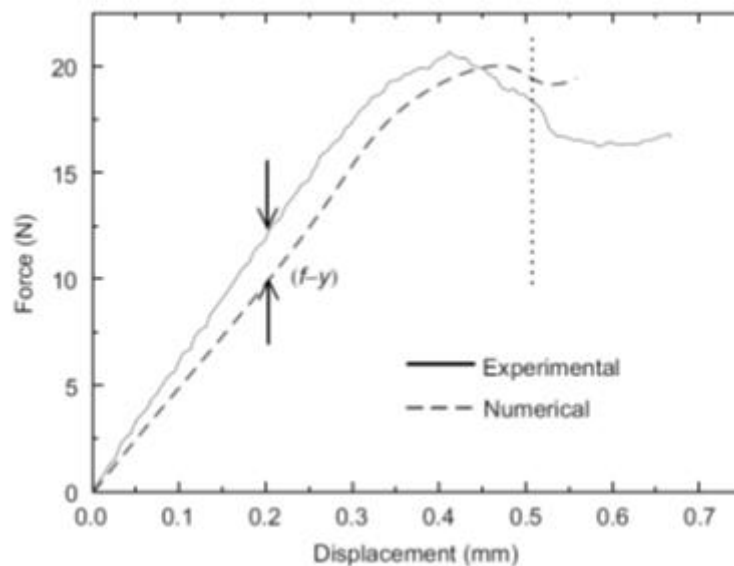


Figura 70 – Erro definido pela técnica KM, por comparação entre os dados experimentais e da análise MEF [79]

Foi definida uma função de erro como a diferença entre as curvas $P-\delta$ experimentais e as obtidas pela análise MEF. Os parâmetros de dano coesivo a ser definidos em tração e

corte puros foram estimados por um algoritmo de otimização não-linear para minimização dos desvios entre os resultados experimentais e MEF. Foram considerados os valores obtidos dos parâmetros coesivos em cada modo puro de carga para construção da lei de dano coesivo em tração pura. A validação das leis de dano coesivo propostas foi realizada por consideração de dois modos mistos intermédios por comparação dos resultados dos testes e das simulações MEF com os parâmetros definidos previamente para o modo misto dominante (Figura 71).

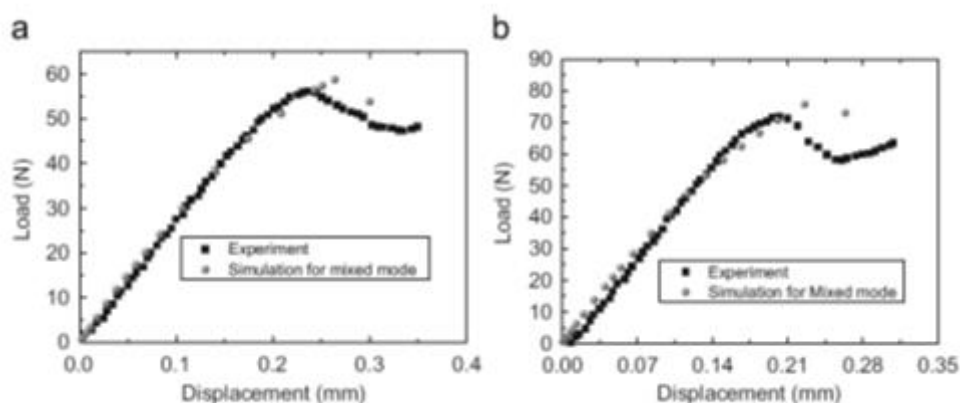


Figura 71 - Curvas P - δ de provetes SLB com rácios de modo misto variáveis, espessura do aderente: a) 1,28 mm b) 1,48 mm [79]

Analisando os resultados globais, os autores concluíram que o procedimento proposto descreve o comportamento da fratura em juntas em modo misto de forma precisa, mostrando a vantagem de não precisar de efetuar dois testes separados como costuma ser necessário.

2.5.3.3 Juntas usadas em aplicações reais de modo misto

Neste capítulo são descritos alguns trabalhos de investigadores que aplicaram MDC na simulação de juntas reais em aplicações estáticas sob cargas de modo misto:

Yang e Thouless [89] simularam a fratura em modo misto de provetes em T e juntas de sobreposição simples plasticamente deformados de forma assimétrica usando um modelo de dano coesivo dependente do modo para simular a ligação adesiva (Ciba® XD4600), através de uma modelação pela aproximação contínua.

Os parâmetros coesivos à tração e ao corte foram obtidos através de trabalhos anteriores onde foram combinados com critérios de propagação em modo misto para fornecer previsões quantitativas da deformação e da carga de fratura, de estruturas adesivas, sob uma carga de modo misto. As leis coesivas de tensão e de corte, anteriormente desenvolvidas para este adesivo [90, 91], foram usadas sem modificações.

Visto que experimentalmente ambas as geometrias avaliadas sofrem fraturas adesivas, os parâmetros coesivos de corte do trabalho de Yang [90] não foram considerados válidos, já que são relativos a fraturas coesivas. Consequentemente, estes parâmetros foram determinados pelo teste em cunha de provetes DCB. A fratura interfacial foi induzida colocando uma tira de Teflon® antes da cura do provete.

Para os provetes em T, os resultados analíticos corresponderam bem com os experimentais, no que diz respeito às curvas $P-\delta$, às deformações e rotações, extensão da fratura e flexão assimétrica (Figura 72).

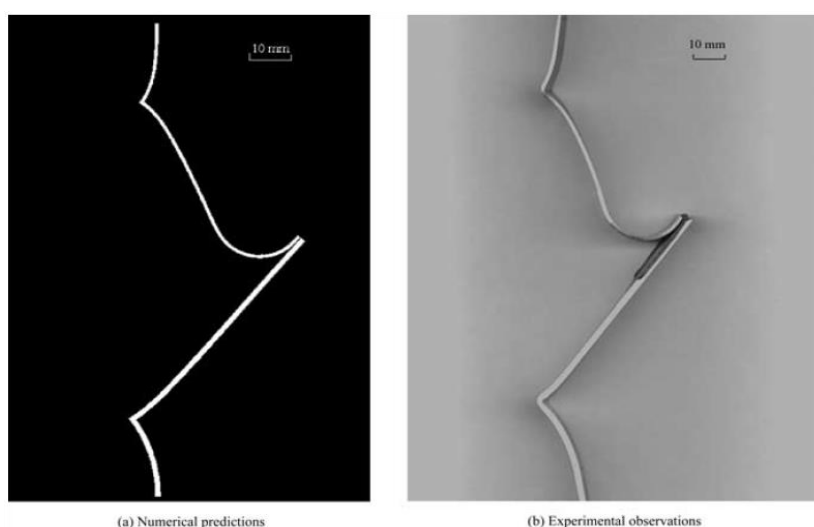


Figura 72 – Comparação entre previsões numéricas (a) e observações experimentais (b) de um provete em T assimétrico [89]

Relativamente às juntas de sobreposição simples, as simulações numéricas previram com precisão os comportamentos de tensão-deformação das juntas, conseguindo obter a influência de t_p nas cargas e deformações da fratura. Todas as características relevantes como as deformações, cargas, deslocamentos e propagação da fenda foram bem capturadas pelas simulações.

Kafkalidis e Thouless [92] procederam a uma análise MEF de juntas de sobreposição simétricas e assimétricas aplicando a aproximação contínua que incluía a plasticidade do adesivo através da utilização de uma lei coesiva trapezoidal. As leis de dano coesivo, critério de propagação e procedimento de análise foram similares ao trabalho de Yang e Thouless [89]. Usando os parâmetros coesivos determinados para uma dada combinação de materiais, as previsões numéricas para diferentes juntas adesivas (variando o comprimento de sobreposição e t_p) mostraram uma excelente conformidade com as observações experimentais.

A Figura 73 compara os valores de força obtidos experimental e numericamente de um conjunto de juntas de sobreposição simétricas com $t_p=2,0$ mm e com aderentes de alumínio de $t_A=0,25$ mm coladas pelo adesivo Ciba® XD4600.

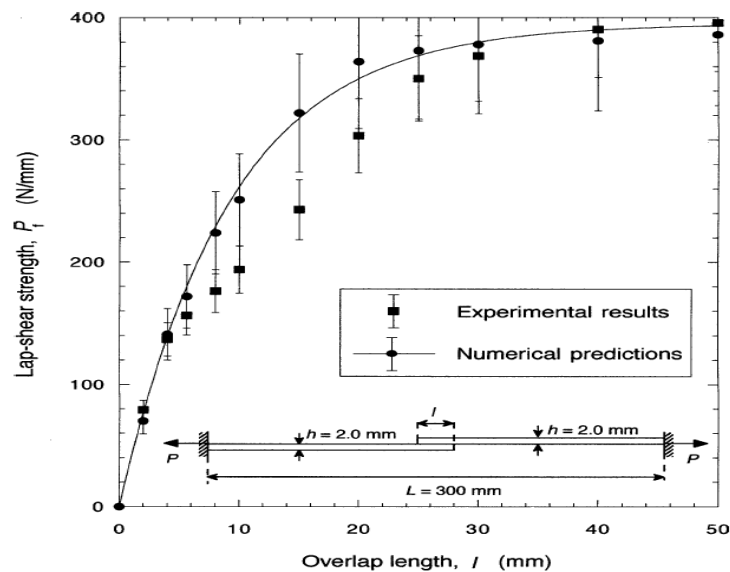


Figura 73 - Resistência de juntas de sobreposição obtida experimental e numericamente em função do comprimento de sobreposição [92]

A ligeira discrepância na previsão de resistência foi justificada pela sensibilidade do comportamento das juntas às condições fronteira. De facto, a configuração experimental resultou num ligeiro desalinhamento dos apertos, o que não é contabilizado nas simulações.

A Figura 74 mostra a previsão numérica da sequência de deformação e crescimento da fratura para uma junta de sobreposição assimétrica com um rácio de t_p de dois, que foi coerente com o comportamento experimental observado.

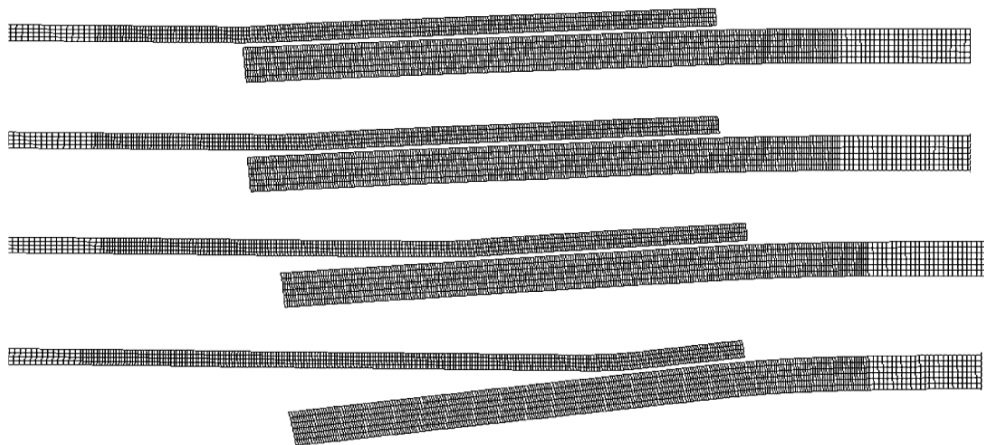


Figura 74 – Sequência de deformação e crescimento de fenda numa junta de sobreposição assimétrica [92]

De forma geral os modelos analíticos previram de forma correta as cargas máximas, deslocamentos e deformações das juntas.

Campilho et al. [93] testaram experimentalmente reparações de remendo embebido em compósitos de carbono-epóxico, com ângulos de reparos entre 2° e 45°. Consideraram-se modelos de dano coesivo para a previsão da resistência. Para ter em conta o comportamento dúctil do adesivo (Huntsman Araldite® 2015) foi usada uma lei de dano coesivo trapezoidal incluindo a plasticidade do adesivo.

As leis coesivas da camada de adesivo – aproximação contínua – e do compósito interlaminar e intralaminar (na direção transversal e da fibra) – aproximação local – necessárias para replicar numericamente os caminhos da fratura experimentais, foram previamente caracterizadas com testes DCB e ENF para tração e corte, respetivamente, usando uma metodologia inversa.

A validação do modelo proposto com resultados experimentais foi conseguida em termos da rigidez global, resistência e correspondente valor de δ , e modo de fratura. A Figura 75 mostra a colocação dos elementos coesivos de reparação adesiva.

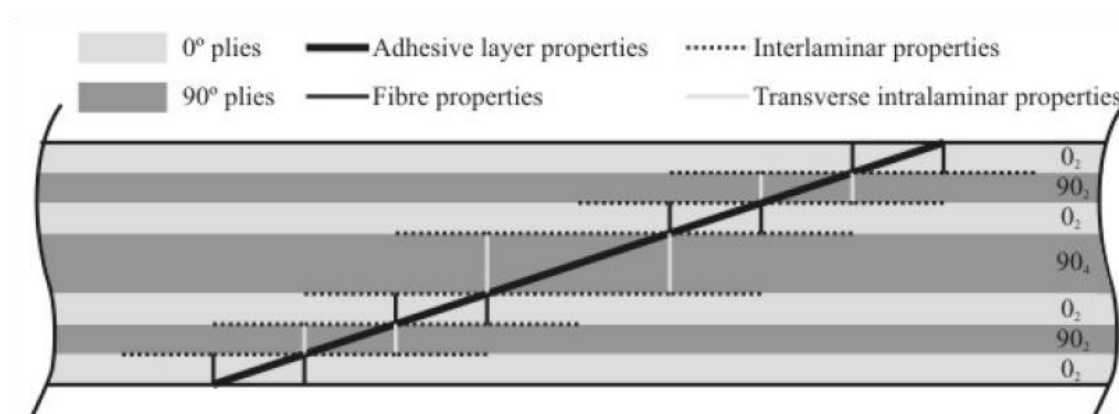


Figura 75 – Colocação dos elementos coesivos com diferentes leis de dano coesivo nos modelos de MEF [93]

Os elementos representativos do adesivo foram inseridos ao longo da camada de adesivo substituindo a ligação adesiva, os elementos interlaminares foram posicionados entre camadas com diferentes orientações, os elementos intralaminar transversais foram usados verticalmente em camadas a 90° para simular a fratura intralaminar da matriz, e os elementos da fibra foram colocados verticalmente em camadas a 0° para simular a fratura da fibra. Foram observados experimentalmente dois modos distintos de fratura, tipo A para ângulos de reparações com 15°, 25° e 45°, consistindo numa fratura coesiva do adesivo, e tipo B para ângulos de 2°, 3°, 6° e 9°, representando uma fratura mista coesiva e interlaminar (Figura 76).

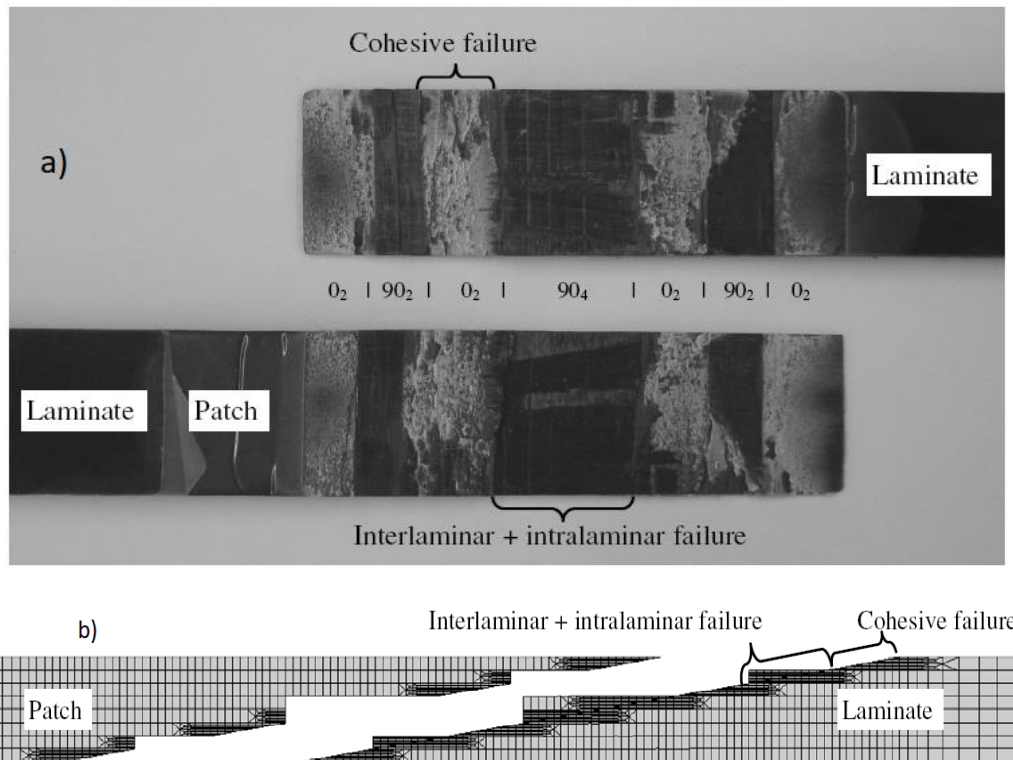


Figura 76 – Modo de fratura B para ângulo de 3°: a) superfícies de fratura experimentais e b) previsão numérica [93]

As simulações numéricas reproduziram de forma correta os modos de fratura experimentais, e as modificações na fratura entre os tipos A e B, demonstrando a eficácia da modelação por danos coesivos em aplicações estáticas.

A Figura 77 reporta os resultados da resistência das reparações, mostrando um aumento exponencial com a redução do ângulo, relacionado com o aumento de área de corte avaliada para transferência de carga entre os aderentes e o remendo, acompanhado por uma redução de tensões de arrancamento ao longo do comprimento da reparação.

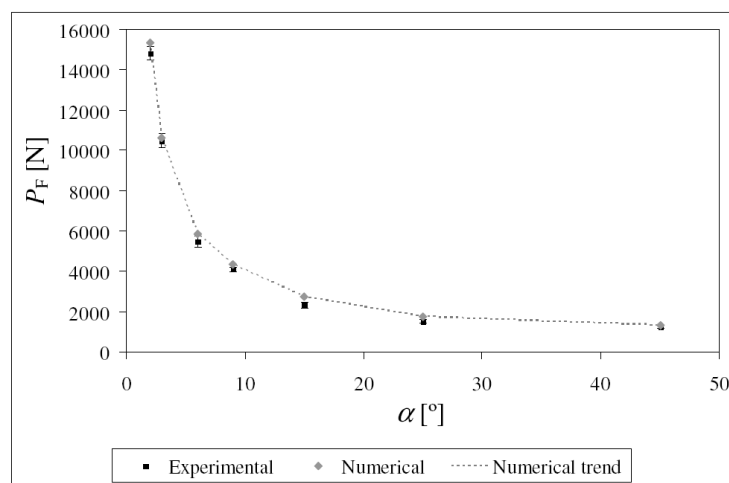


Figura 77 - Resistência experimental e numérica das reparações em função do ângulo [93]

De forma geral, os resultados experimentais e numéricos mostraram uma boa concordância na rigidez elástica global, resistência e respetivo valor de δ , embora este ultimo exiba algumas variações, que foram induzidas pelas dificuldades em obter os valores selecionados de t_A durante a fabricação dos provetes. Em função dos resultados descritos, os autores concluíram que os modelos de dano coesivo podem ser aplicados com sucesso para prever o comportamento mecânica de estruturas adesivas.

Campilho et al. [94] realizaram trabalhos numéricos de otimização de reparos adesivos de sobreposição sujeitas a tração. Foram considerados modelos de dano coesivo para a modelação local do adesivo e para provocar o crescimento da fratura, enquanto a ligação adesiva dútil (Huntsman Araldite® 420) foi modelada por elementos finitos coesivos.

A validação do procedimento foi inicialmente conseguida com os resultados experimentais disponíveis na literatura. Foram testadas as seguintes técnicas e respetivas combinações foram testadas: chanfrando as faces interiores e exteriores do remendo no fim da sobreposição, tapando as lacunas dos aderentes com adesivo, aplicação de filetes com diferente formas e dimensões no final dos remendos e chanfrando as arestas interiores e exteriores dos remendos.

Para reparações de sobreposição simples os filetes a 45° (incluindo toda a espessura do remendo) e o chanfro interior e exterior dos aderentes foram as soluções mais eficientes. Pela combinação destas três modificações (Figura 78), foi conseguida uma melhoria da resistência global de 27%.

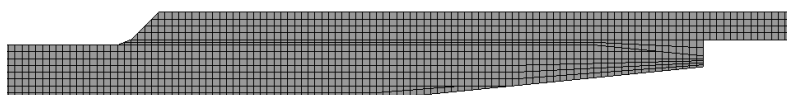


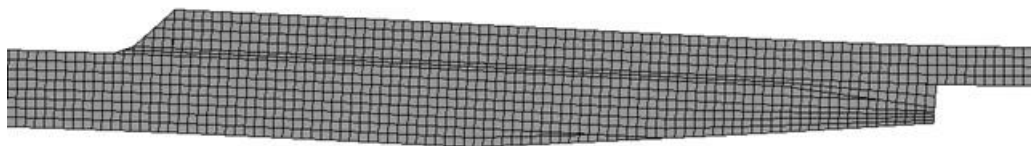
Figura 78 -Reparos de sobreposição simples com combinação de chanfro de 45° com aplicação de chanfro no interior e exterior dos aderentes [94]

Nas reparações de sobreposição dupla, foi atingida uma melhoria de 12% pela utilização do filete de 45° e preenchimento das lacunas dos aderentes. Foram também realizados estudos paramétricos em relação à sequência de empilhamento dos aderentes/remendos e efeitos das lacunas dos aderentes na previsão da resistência.

Na geometria sobreposição simples, os formatos dos aderentes revelaram-se particularmente significativos por causa da influencia na flexão dos remendos. Sequências de empilhamento com camadas orientadas com a carga nas superfícies livres do aderente eram as recomendadas relativamente à redução dos esforços de arrancamento.

A Figura 79 refere-se a aderentes rígidos (a) e aderentes flexíveis (b) sob cargas aplicadas de forma similar e mostra o crescimento da fratura apenas nos aderentes flexíveis por causa do maior esforço de arrancamento.

a)



b)

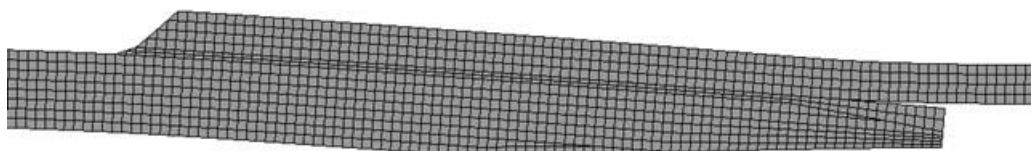


Figura 79 – Configuração deformada das reparações: a) aderentes rijos b) aderentes flexíveis. Mesmo valor de carga [94]

As reparações de sobreposição simples mostraram uma variação negligenciável na resistência por causa da eliminação da flexão dos aderentes. Por outro lado, as reparações apenas foram afetadas pelas lacunas dos aderentes para valores inferiores a 5 mm. Foi descoberta uma redução progressiva da resistência abaixo deste valor devido às concentrações de tensões localizadas nas extremidades da sobreposição. No fim, foram propostos princípios de projeto para o aumento da resistência das reparações adesivas em estruturas de material compósito.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Neste capítulo é descrito o procedimento experimental dos ensaios realizados, é descrita a construção e preparação dos provetes, as condições da realização dos ensaios e os resultados obtidos nos mesmos.

3.1.1 Materiais utilizados

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais usados no trabalho experimental, mais propriamente os substratos e os adesivos, e é feita uma análise detalhada das suas propriedades mecânicas mais relevantes para a análise numérica a realizar.

3.1.1.1 Substratos

Para o fabrico dos substratos DCB e TDCB foi utilizado o aço C45E. Este material é um aço ao carbono de baixa liga, que apresenta as propriedades apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades do aço C45E

Propriedades	C45E
Tensão de cedência [MPa]	375
Módulo de Young, E [GPa]	210
Módulo de corte, G [GPa]	80
Densidade [kg/m ³]	7850
Dureza [HB]	163
Código [DIN]	1654

O aço C45E, também designado comercialmente por F10 (designação dada pelo F. Ramada), apresenta uma elevada rigidez, igual à de qualquer aço (210 GPa), razoável maquinabilidade e baixo custo de aquisição. Para além destas características, este aço, também designado por AISI 1045, possui propriedades menos favoráveis, tais como: fraca resistência ao impacto e baixas temperaturas e baixa resistência à corrosão. Este aço pode ser encontrado em aplicações como veios, cavilhas e parafusos, por exemplo.

É possível encontrar o C45E em elementos estruturais de ferramentas de injeção de plástico.

3.1.1.2 Adesivos

Neste tópico descrevem-se os adesivos usados no trabalho experimental e suas propriedades. Nos ensaios efetuados usaram-se três tipos de adesivos: o Araldite® AV138, que se caracteriza por ser um adesivo epóxico frágil, o Araldite® 2015, definido como sendo um adesivo epóxico dúctil, e o adesivo SikaForce® 7752, que se caracteriza como um adesivo poliuretano estrutural que combina elevada ductilidade com resistência mecânica moderada.

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 descreve-se como um adesivo epóxico frágil, mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [95]. As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 80.

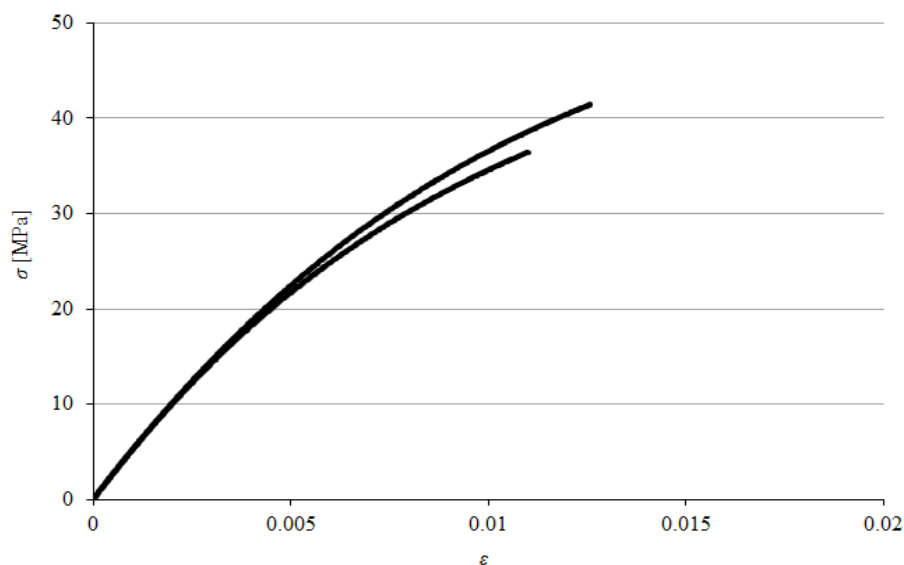


Figura 80 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [96]

Na Tabela 7 visualizam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [97]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coeficiente de Poisson, ν	0,35 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade ao corte, G_{13} [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	7,8±0,7
^a valor do fabricante.	

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural de duas partes, de ductilidade moderada e que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração, tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [95]. A Figura 81 apresentam as curvas σ - ϵ de provetes maciços para este adesivo.

Na Tabela 8 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

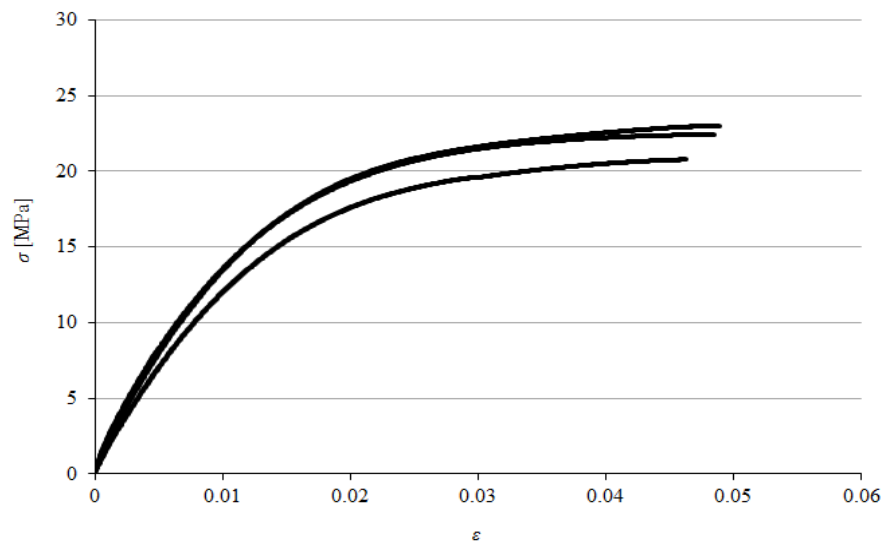


Figura 81 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [96]

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [95]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coeficiente de Poisson, ν	$0,33^a$
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de elasticidade ao corte, G_{13} [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$14,6 \pm 1,3$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$17,9 \pm 1,8$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$43,9 \pm 3,4$

^a valor do fabricante.

Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de

rotura ao corte e à tração do Araldite® AV138 é praticamente o dobro da do Araldite® 2015.

3.1.1.2.3 SikaForce® 7752

O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo dúctil, conforme se pode observar na curva σ - ϵ da Figura 83. Comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, o SikaForce® 7752 é o que apresenta a menor resistência ao corte e tração dos três adesivos, no entanto é o mais dúctil do conjunto. Trata-se de um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/20 g, respetivamente [98].

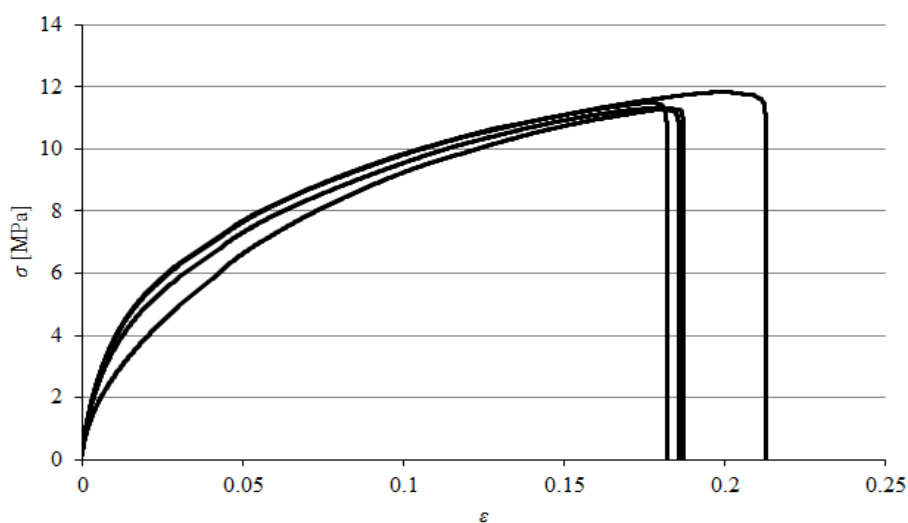


Figura 82 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de SikaForce® 7752 [98]

Na Tabela 9 apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo. Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas coladas com este adesivo seja elevada, pois este adesivo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [99].

Os substratos utilizados foram fabricados segundo a norma ASTM D3433-99. O substrato DCB é uma barra com espessura constante de $h = 12,7$ mm, largura de $B = 25,4$ mm e comprimento de $L = 241,3$ mm. O substrato TDCB apresenta espessura variável crescente na zona intermédia do seu comprimento. Nesta zona o m é constante satisfaz a equação (3).

De seguida são apresentadas as dimensões dos provetes usados:

- $h(a)$ espessura em função do comprimento de fenda;
- $h = 12,7$ mm;
- $B = 25,4$ mm;
- $t_A = 1$ mm;
- $L = 241,3$ mm;
- a_0 variável.

3.1.3 Processo de fabrico

Tanto os substratos DCB como os TDCB estavam já produzidos, foram produzidos maquinagem nas oficinas do ISEP em trabalho anteriores e disponíveis no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP, em aço C45E e com a geometria segundo a norma ASTM D3433-99. Havia apenas 14 substratos disponíveis de cada tipo (DCB e TDCB). Como seria necessário um conjunto de 7 provetes ensaiar para cada adesivo, optou-se por realizar um conjunto de 7 ensaios para um adesivo e posteriormente um conjunto de 14 ensaios para os restantes adesivos.

Com os substratos já fabricados iniciou-se a construção dos provetes pela preparação dos espaçadores e das lâminas. Os espaçadores são usados para garantir a espessura de 1 mm da camada de adesivo numa extremidade dos provetes, e as lâminas são colocadas de forma a induzir a pré-fenda na outra extremidade.

Os espaçadores e as lâminas também já estavam disponíveis nos laboratórios por isso não houve a necessidade de os produzir, contudo tinham sido já utilizados previamente noutros ensaios pelo que apresentavam ainda resíduos de cola na sua superfície (Figura 84).



Figura 84 - Resíduos de cola nos espaçadores

A sua preparação assim começou com a remoção dos resíduos de cola com um X-acto (Figura 85) e posteriormente a limpeza com acetona, que para além de ajudar a remover os resíduos também tinha o propósito de desengordurar as superfícies.



Figura 85 - Remoção dos resíduos de cola e limpeza dos espaçadores e lâminas

Para além da limpeza, como algumas lâminas se apresentavam descoladas, foi necessário voltar a colá-las. As lâminas consistem em dois espaçadores de 0,45 mm com uma lâmina de 0,1 mm entre eles, perfazendo assim uma espessura total de 1 mm como pretendido. A sua colagem foi efetuada após a limpeza dos espaçadores e das lâminas com uma cola LOCTITE Super Cola3 (adesivo cianoacrilato).

Antes de colar os espaçadores e as lâminas nos substratos foi necessário aplicar um desmoldante para facilitar a sua remoção após o ensaio. Para isso foi necessário primeiro aquecer os espaçadores, o que foi realizado num forno elétrico (Figura 86), disponível nos laboratórios, a uma temperatura de 100°C durante 15 min.



Figura 86 - Aquecimento dos espaçadores num forno elétrico

Após remoção dos espaçadores e lâminas do forno é aplicado o desmoldante Loctite® 770-NC (Figura 87).



Figura 87 – Desmoldante Loctite® 770-NC

O desmoldante foi aplicado com um pincel (Figura 87) três vezes em cada uma das faces dos espaçadores e das lâminas.

Com os espaçadores e as lâminas prontos seguiu-se a preparação das superfícies dos substratos. A preparação das superfícies dos substratos antes da colagem é um dos mais importantes fatores no processo de ligação por adesivos, e tem como objetivo proporcionar superfícies de ligação coesivamente fortes e facilmente molháveis [2]. Uma superfície ideal para ser colada deve obedecer a quatro critérios: limpeza, continuidade, estabilidade e molhabilidade da superfície pelo adesivo [1].

Antes da colagem foram efetuados dois tipos de tratamentos passivos nas superfícies dos substratos. Tratamento passivos são tratamentos que não alteram ativamente a natureza química da superfície, apenas limpam as superfícies e removem as camadas limítrofes fracas sob a forma de contaminação [1, 2]. Foram usados tratamentos passivos químicos, são tratamentos que removem contaminantes como, sujidade, óleos, gorduras, humidade ou impressões digitais [1] e tratamentos passivos mecânicos, que são importantes para aumentar área de superfície do substrato que entra em contacto com o adesivo. Assim, consegue-se melhorar a molhabilidade da superfície ao adesivo, para além de remover camadas as camadas limítrofes fracas sob a forma de contaminação [1, 2].

Foi primeiramente aplicado um processo passivo químico, que consistiu na limpeza das superfícies com acetona para remover contaminantes. O seguinte tratamento foi um tratamento passivo mecânico, para o qual se considerou a grenalhagem da superfície

dos provetes, a seco, na grenalhadora CIDBLAST® RT 6S, disponível nos laboratórios do ISEP, para melhorar a molhabilidade das superfícies ao adesivo. A preparação da superfície dos provetes ficou concluída com uma nova limpeza com acetona para remover as areias e a sujidade que resultam do processo de grenalhagem e também remover possíveis contaminantes que possam ter atingido a superfície durante o processo.

Com a superfície dos substratos prontas são colocados os espaçadores e as lâminas. São ambos colados entre os substratos com uma cola LOCTITE Super Cola3 (adesivo cianoacrilato). As lâminas são colocadas na extremidade mais próxima do ponto onde irá ser imposta a carga e os espaçadores são colocados na extremidade oposta, como se pode ver na Figura 88.



Figura 88 - Posicionamento dos espaçadores/lâminas nos substratos

Com os espaçadores e as lâminas colocados, inicia-se a preparação dos adesivos, que apresentam algumas diferenças, principalmente no que toca às razões de mistura com o endurecedor, ou em relação ao modo de aplicação como no caso do Araldite® 2015.

O SikaForce® 7752 é misturado com o endurecedor com uma razão de peso resina/endurecedor de 5/1. Já a razão de mistura do Araldite® AV138 foi de 5/2. A mistura é efetuada com uma colher até se obter uma mistura homogênea. Após se obter a mistura homogênea é aplicada, com uma espátula, uma camada entre os espaçadores com o cuidado de aplicar da forma mais uniforme possível para não criar vazios na camada.

O Araldite® 2015 foi aplicado usando uma pistola manual através de bico de mistura e a sua aplicação foi feita em zigue-zague, como se pode ver na Figura 89, sem folga entre linhas de forma a evitar os vazios na camada.



Figura 89 - Aplicação do adesivo Araldite® 2015

Após a aplicação do adesivo no substrato inferior (DCB) é colocado superiormente, e posteriormente pressionado, o substrato superior (TDCB). Para facilitar o processo de adesão e evitar desalinhamentos durante o processo de cura foram colocados pesos sobre os provetes, como demonstra a Figura 90.

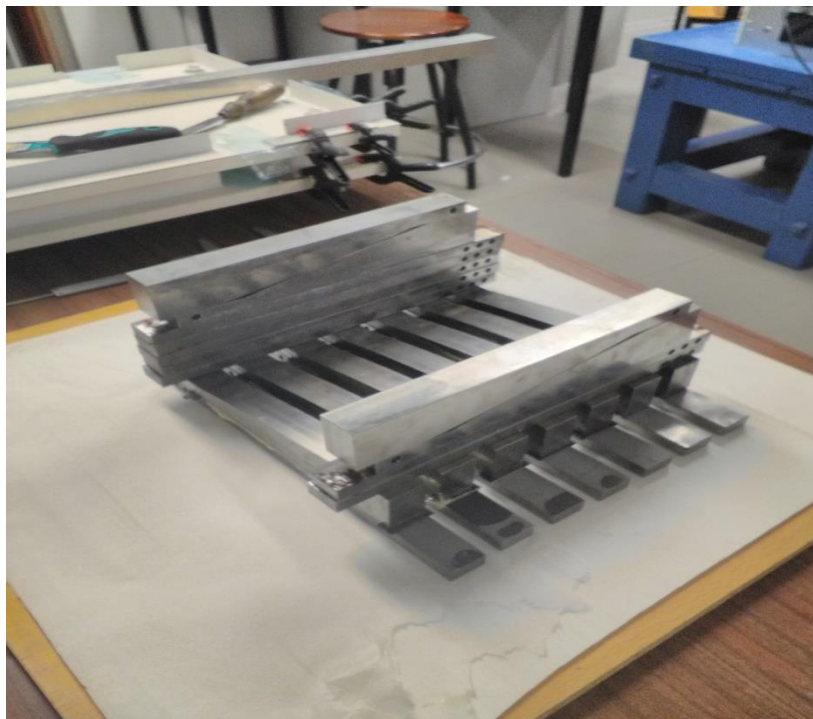


Figura 90 - Colocação de pesos sobre os provetes para evitar desalinhamentos

Os provetes foram curados durante 3 dias e após a cura procedeu-se à remoção dos excessos de adesivo presentes nas bordas dos provetes, dos espaçadores e das lâminas. A remoção dos excessos foi efetuada com um X-ato e um alicate (Figura 91). Após a sua remoção procedeu-se a limpeza dos provetes com acetona.



Figura 91 - Remoção dos excessos de adesivo

Com os excessos de adesivo removido e as superfícies dos provetes limpos foi aplicado corretor na parte lateral do provete (Figura 92). O corretor é aplicado para facilitar a visualização do crescimento da fenda ao longo do ensaio, já que a abertura dos provetes provoca a fissura da camada do corretor e, devido à sua cor branca, essa fissura torna-se bem visível como um risco negro ao longo da camada.

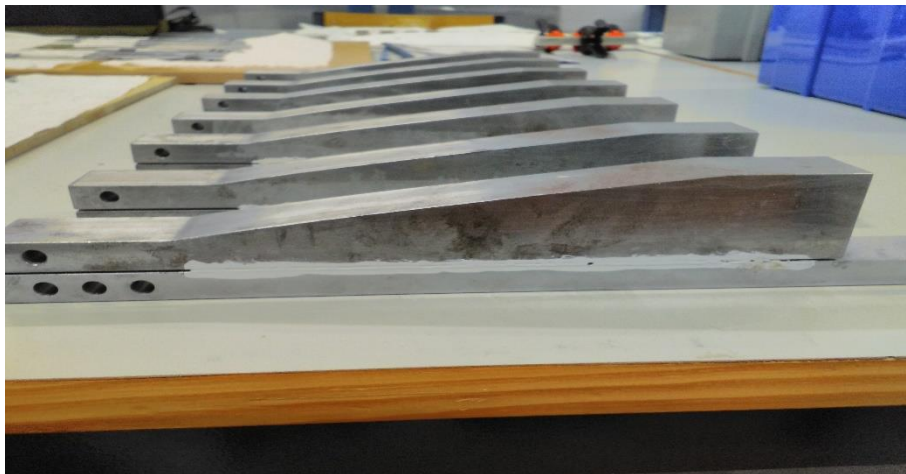


Figura 92 - Provetes com o corretor aplicado

A última etapa da preparação dos provetes é a colocação de uma fita de papel autocolante, com uma escala métrica impressa, sobre a camada de corretor na parte inferior do provete superior (TDCB), como se pode ver na Figura 93. Esta escala será

posteriormente usada para medir a propagação da fenda ao longo do ensaio. Com a escala métrica colocada os provetes ficam prontos para serem ensaiados.



Figura 93 - Provette pronto com a escala métrica colocada

3.1.4 Ensaio das juntas

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de ensaio mecânicos do ISEP. Para a realização dos ensaios foi utilizada a máquina de ensaios Shimadzu® AG-X 100, equipada com uma célula de carga de 100 kN. Os provetes foram fixados ao equipamento por amarras em “U”, encaixadas nos orifícios presentes nos substratos já com esta intencionalidade. Será nesta fixação que será imposta a carga que provocará a abertura dos provetes. A outra extremidade dos provetes foi suspensa por fios de forma a manter o provete perfeitamente horizontal (Figura 94).

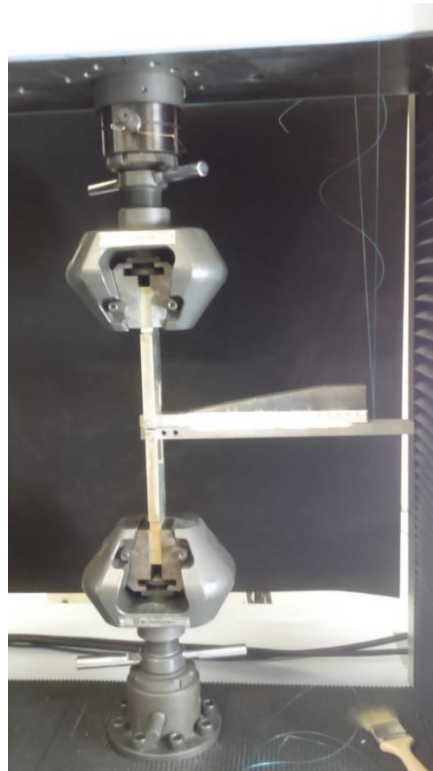


Figura 94 - Fixação do provete na máquina de ensaios

O equipamento efetuou o registo dos valores de carga e de deslocamento a cada 0,2 segundos, e registou assim a curva $P-\delta$ de cada ensaio.

A propagação da fenda foi registada recorrendo a uma camara fotográfica digital CANON® modelo EOS 700 D com uma resolução de 20,2 MPixel. A camara ficou apontada à zona lateral do provete (Figura 95), e foi focada a camada de corretor de forma a poder-se observar da melhor forma possível o crescimento da fenda. Foi tirada uma foto antes do começar o ensaio e após o início do ensaio foram tiradas fotos a cada 5 segundos.



Figura 95 - Camara fotográfica utilizada e seu posicionamento

A velocidade ensaio dependeu da ductilidade de cada adesivo. Sendo o adesivo SikaForce® 7752 o adesivo mais dúctil, foi-lhe aplicada uma velocidade superior de forma a reduzir o tempo de ensaio, já para o adesivo Araldite® 2015, sendo um adesivo consideravelmente mais frágil, estimou-se que pouco mais de metade da velocidade, 0,65 mm/min, fosse suficiente. Para o adesivo Araldite® AV138 foi-lhe aplicado a velocidade de ensaio mais baixa devido à sua elevada fragilidade (Tabela 10). Considerou-se esta diferença de velocidades de ensaio para garantir pelo menos 30 medições durante a propagação de fenda, sem, no entanto, comprometer a análise em condições quase-estáticas.

Tabela 10 - Velocidade de ensaio de cada adesivo

Adesivo	Velocidade de ensaio (mm/min)
Araldite® AV138	0,3
Araldite® 2015	0,5
SikaForce® 7752	1,0

Todos os provetes foram pré-carregados para evitar um início brusco da propagação da fenda. Na Tabela 11 pode-se observar o comprimento entre o ponto de carregamento e o zero da escala (a_1) e o comprimento entre o zero da escala e a extremidade da fenda (a_2), medido após pré-carregamento. O valor de a_0 é determinado por $a_1 + a_2$.

Tabela 11 – Comprimento inicial e de pré-fenda de cada ensaio (mm)

Proвете	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752	
	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2
1	38,79	19,00	34,35	7,88	35,72	22,50
2	35,12	17,75	35,20	10,50	35,03	17,50
3	37,32	18,5	36,04	15,75	35,43	21,25
4	36,36	7,50	34,97	9,25	35,73	9,25
5	36,03	9,75	35,11	8,5	35,70	20,25
6	35,76	28,5	35,02	4,5	35,64	12,50
7	37,17	7,0	34,46	10,25	35,74	3,75

3.1.5 Resultados obtidos

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios experimentais, os quais serão apresentados na forma de curvas $P-\delta$ de cada provete (obtidas pelos dados fornecidos pela máquina de ensaio), as curvas- R de cada provete e os respectivos envelopes de fratura de cada adesivo. Por fim são apresentadas as conclusões que se pode retirar dos resultados obtidos, para isso serão analisados os desvios entre provetes e comparados os valores obtidos entre adesivos.

As curvas- R permitem analisar a evolução da energia de deformação libertada ao longo do ensaio. Estas curvas foram construídas com os valores de G , G_I e G_{II} em função do comprimento de fenda, a . Os valores de G foram calculados aplicando o procedimento descrito no capítulo 2.4.2 e a formula (22). Já os valores de G_I e G_{II} foram calculados resolvendo o sistema (26).

Os envelopes de fratura permitem avaliar qual o critério de modo misto mais adequado para a simulação da junta adesiva em modelos numéricos. Os critérios de modo misto permitem avaliar a combinação de modos de fratura e deve ser escolhido para cada adesivo o critério de modo misto que mais se adequa para satisfazer a equação:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta = 1. \quad (27)$$

Os parâmetros dos critérios utilizados na análise dos ensaios são descritos na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros usados nos critérios de modo misto

Critério	α	β
1/2	1/2	1/2
Linear	1	1
3/2	3/2	3/2
Quadrático	2	2

Os valores de G_I e G_{II} usados na construção dos envelopes de fratura são retirados na zona da curva- R em que se estabelece um patamar (zona em que os valores se mantêm constantes), ou seja, numa zona em que a fenda propagou de forma estável. Os valores de G_{IC} e G_{IIC} de cada adesivo foram obtidos em trabalhos anteriores, tipicamente por ensaio DCB (G_{IC}) e ENF (G_{IIC}) e são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de G_{IC} e G_{IIC} característicos de cada adesivo analisado

Adesivo	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
Araldite® AV138	0,19 [100]	0,35 [101]
Araldite® 2015	0,70 [100]	3 [101]
SikaForce® 7752	2,87 [100]	5,56 [101]

3.1.5.1 Araldite® AV138

As curvas P - δ obtidas nos ensaios com os provetes colados com Araldite® AV138 podem ser observadas na Figura 96.

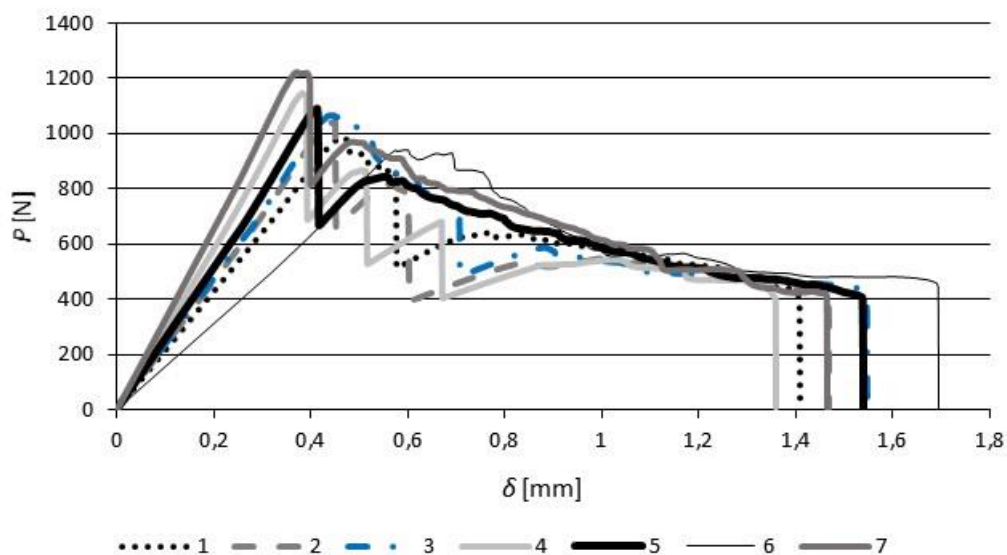


Figura 96 – Curvas P - δ do adesivo Araldite® AV138

Pela análise da curva P - δ da Figura 96 observa-se que os provetes tiveram comportamentos bastante idênticos. A rigidez dos provetes até à fratura apresenta alguma variação, sendo de destacar o provete 6 que demonstra uma rigidez significativamente inferior aos restantes, o que é consequência do maior valor de a_0 deste provete em relação aos restantes.

A maioria dos provetes, exceto os provetes 3 e 6, apresentou uma diminuição abrupta da carga após a fratura, o que indica que este é um adesivo frágil. Também se observa que ocorrem em quase todos os provetes, exceto no provete 6, mais variações abruptas no valor da carga durante o ensaio, o que também é explicado pela fragilidade do adesivo, que leva a fenda a propagar de forma irregular.

A análise da Tabela 14 permite observar que tanto o desvio padrão da força máxima ($\approx 8\%$) como do deslocamento de rotura ($\approx 6\%$) foram relativamente baixos. Apenas de destacar o provete 7 que atingiu uma força máxima significativamente superior aos restantes. Em relação ao deslocamento de rotura, é também de salientar o provete 6 que atingiu um valor de deslocamento máximo significativamente superior aos restantes, o que pode estar relacionado com o facto de este ter sido o provete com a propagação de fenda mais estável.

Tabela 14 – Valores de força máxima de deslocamento de rotura registados nos ensaios com o adesivo Araldite® AV138

Provete	Força máxima [N]	Deslocamento de rotura [mm]
1	982,73	0,63
2	1043,03	0,66
3	1064,17	0,70
4	1141,61	0,61
5	1078,54	0,69
6	943,21	0,74
7	1216,01	0,66
Média	1067,04	0,67
Desvio Padrão	85,28	0,04

São apresentadas na Figura 97 e na Figura 98 as curvas-*R* de G , G_I e G_{II} dos provetes 6 e 7, respetivamente, que foram consideradas representativas destes ensaios.

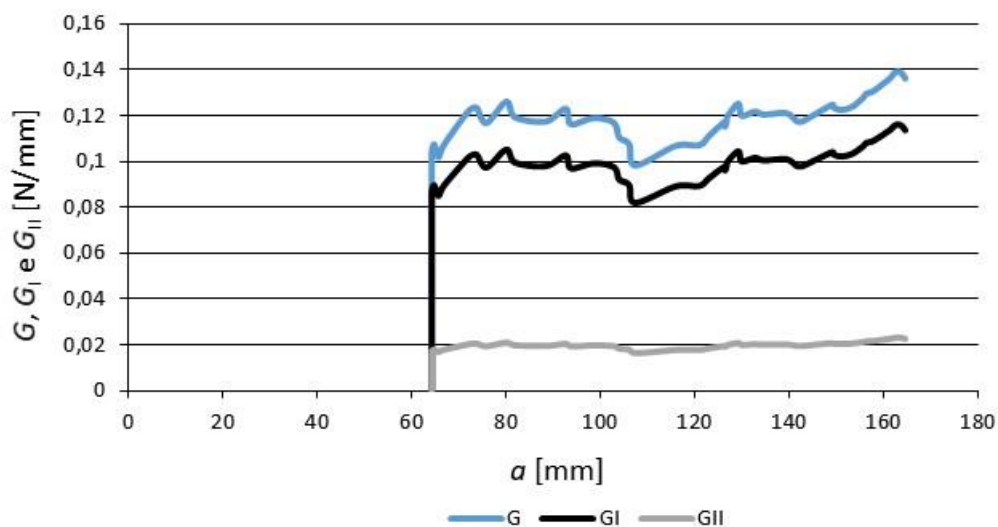


Figura 97 – Curvas-*R* do provete 6 do adesivo Araldite® AV138

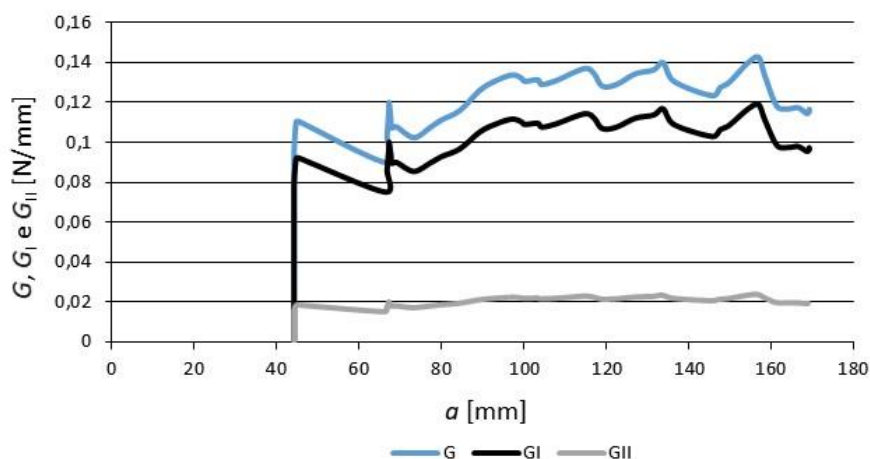


Figura 98 - Curvas-R do provete 7 do adesivo Araldite® AV138

Pode-se observar que, embora as curvas tenham algumas irregularidades, fruto da irregularidade das curvas $P-\delta$, característica dos adesivos mais frágeis, as curvas-R apresentam todas um patamar reconhecível. Isto demonstra que todos os provetes tiveram períodos de propagação de fenda estáveis. Contudo, como consequência das muitas instabilidades, os provetes 2,3 e 4 apresentam patamares. Estes patamares permitiram obter os valores apresentados na Tabela 15:

Tabela 15 – Valores de G , G_I e G_{II} dos ensaios com o adesivo Araldite® AV138

Proвете	G [N/mm]	G_I [N/mm]	G_{II} [N/mm]
1	0,118	0,099	0,019
2	0,114	0,095	0,019
3	0,121	0,101	0,020
4	0,118	0,098	0,020
5	0,117	0,098	0,019
6	0,121	0,101	0,020
7	0,117	0,098	0,019
Média	0,118	0,099	0,019
Desvio Padrão	0,0023	0,0019	0,0005

De salientar que os valores de G , G_I e G_{II} obtidos nos ensaios foram bastante consistentes, sendo que o desvio padrão não atinge sequer os 3% em relação à média. Na Figura 99 pode-se ver os envelopes de fratura do adesivo Araldite® AV138, considerando os expoentes apresentados na Tabela 12, onde estão também representados os pontos da Tabela 15.

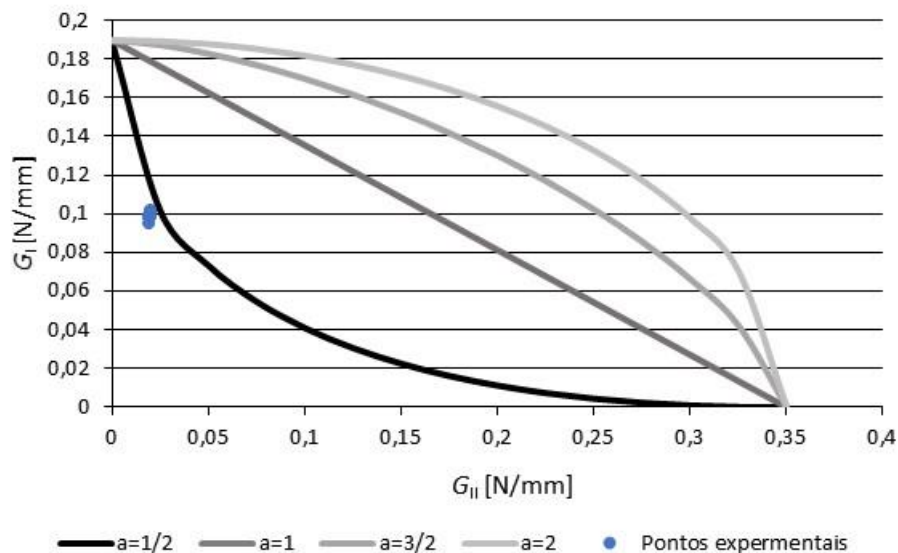


Figura 99 – Envelope de fratura experimental do adesivo Araldite® AV138

A relativamente baixa dispersão dos valores de G_I e G_{II} permite posicionar todos os provetes numa determinada zona do envelope de fratura, bastante próxima do critério $\frac{1}{2}$ e assim identificar com facilidade o critério $\frac{1}{2}$ como o critério de modo misto mais adequado para descrever o comportamento do adesivo Araldite® AV138.

3.1.5.2 Araldite® 2015

Nos resultados do adesivo Araldite® 2015 não é incluído o provete 6 por este provete ter apresentado um comportamento muito diferente dos restantes. Desta forma, este provete foi considerado inválido. Podem-se observar na Figura 100 as curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios com os provetes colados com Araldite® 2015. Pode se observar que os provetes apresentaram uma rigidez bastante similar. Contudo, a propagação de fenda foi significativamente diferente entre provetes o que leva a que tenham curvas $P-\delta$ com formatos um pouco diferentes. De salientar o provete 4 que teve uma propagação de fenda bastante mais acelerada que os restantes provetes.

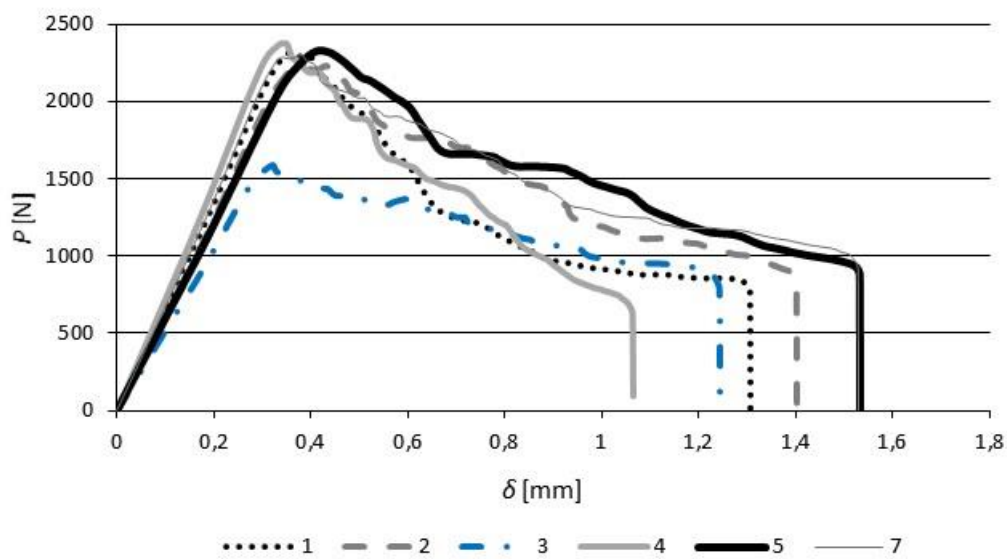


Figura 100 – Curvas P - δ do adesivo Araldite® 2015

Tabela 16 - Valores de força máxima e de deslocamento de rotura registados nos ensaios com o adesivo Araldite® 2015

Provete	Força máxima [N]	Deslocamento de rotura [mm]
1	2311,53	1,31
2	2230,47	1,40
3	1565,04	1,24
4	2374,48	1,07
5	2332,88	1,53
7	2298,12	1,53
Média	2185,47	1,35
Desvio Padrão	280,8	0,16

A análise da Tabela 16 confirma o que se já tinha percebido pela análise das curvas P - δ , ou seja, que o comportamento de alguns provetes foi significativamente diferente dos outros. O desvio padrão tanto da força máxima ($\approx 13\%$) como do deslocamento de rotura ($\approx 11,8\%$) registado no ensaio foi significativo. Para isto muito contribui o provete 3, que

atingiu uma força máxima bastante inferior à média, e o provete 4, que atingiu um deslocamento de rotura mais baixo que a média resultado de ter tido uma propagação de fenda bastante mais acelerada.

São apresentadas na Figura 101 e na Figura 102 as curvas-*R* de G , G_I e G_{II} dos provetes 2 e 5, respetivamente, que foram consideradas representativas destes ensaios.

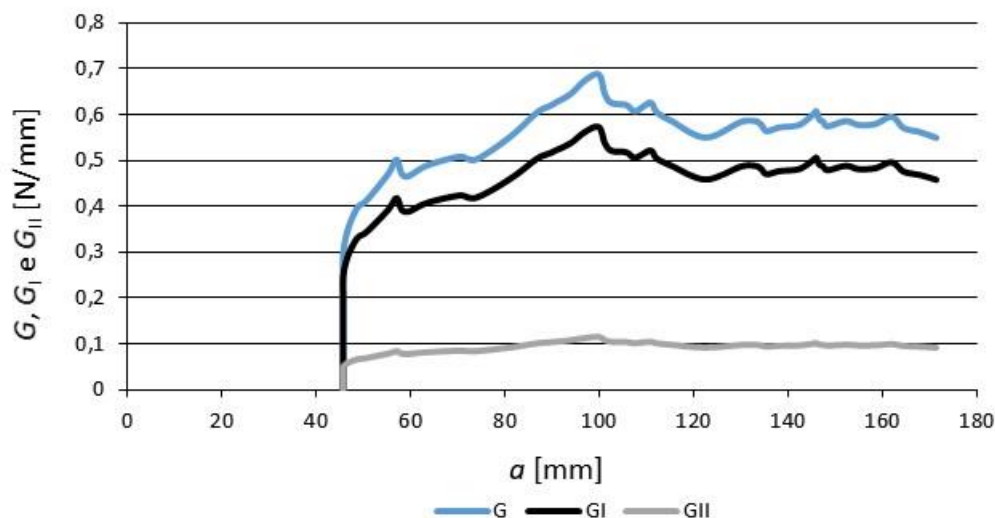


Figura 101 - Curvas-*R* do provete 2 do adesivo Araldite® 2015

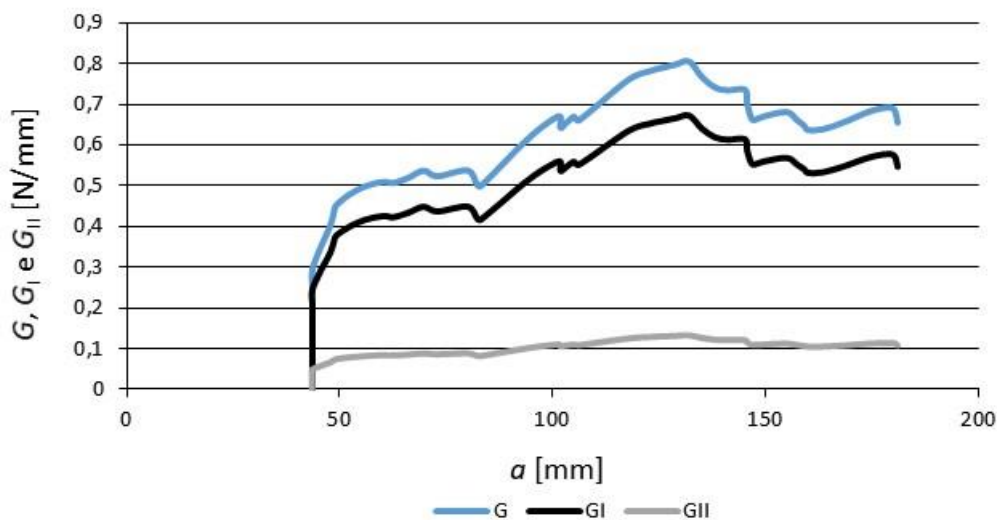


Figura 102 - Curvas-*R* do provete 5 do adesivo Araldite® 2015

Tal como no adesivo Araldite® AV138, as curvas-*R* do adesivo Araldite® 2015 também apresentam todas um patamar reconhecível durante a propagação da fenda. Os valores de G , G_I e G_{II} retirados nestes patamares são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores de G , G_I e G_{II} dos ensaios com o adesivo Araldite® 2015

Provete	G [N/mm]	G_I [N/mm]	G_{II} [N/mm]
1	0,516	0,431	0,085
2	0,505	0,424	0,081
3	0,498	0,415	0,083
4	0,517	0,431	0,086
5	0,506	0,422	0,084
7	0,489	0,410	0,079
Média	0,505	0,422	0,083
Desvio Padrão	0,010	0,008	0,002

Tal como no adesivo Araldite® AV138, os valores obtidos com o adesivo Araldite® 2015 foram bastante consistentes, sendo que o desvio padrão não atinge os 3%. Foram também significativamente superiores aos registados com o adesivo Araldite® AV138 resultados da maior ductilidade do adesivo Araldite® 2015.

Na Figura 103 pode-se ver os envelopes de fratura do adesivo Araldite® 2015, considerando os expoentes apresentados na Tabela 12, onde estão também representados os pontos da Tabela 17.

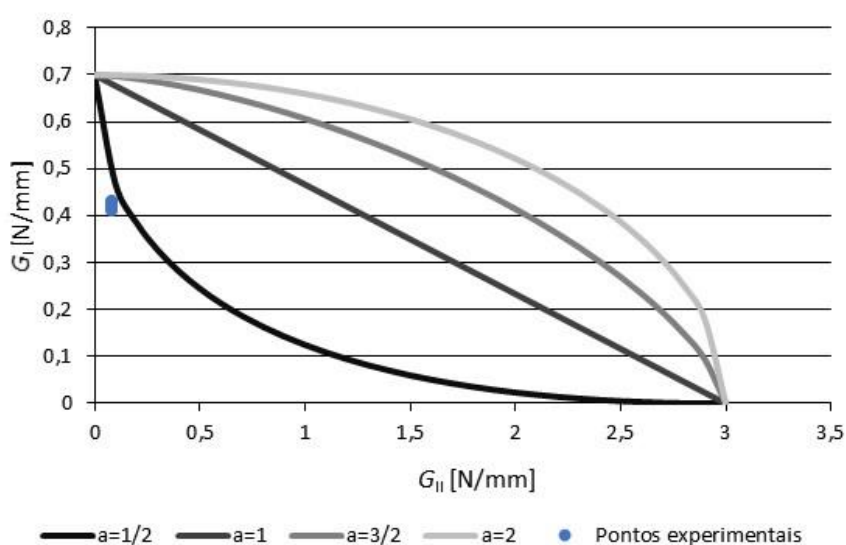


Figura 103 – Envelope de fratura experimental do adesivo Araldite® 2015

A baixa dispersão de valores obtidos nos ensaios com o adesivo Araldite® 2015 permite localizar com facilidade o desempenho deste adesivo no envelope de fratura, o que permite concluir que o critério $\frac{1}{2}$ é também o mais adequado para descrever o comportamento do adesivo Araldite® 2015.

3.1.5.3 SikaForce® 7752

As curvas P - δ obtidas nos ensaios dos provetes colados com o adesivo SikaForce® 7752 podem ser observadas na Figura 104.

Pela análise das curvas P - δ da Figura 104 observa-se que os provetes do adesivo SikaForce® 7752 apresentam uma propagação de fenda mais estável que os outros adesivos, o que significa que este é um adesivo consideravelmente mais dúctil. Também se observa que apresentam curvas P - δ com formatos semelhantes, sendo que foram registadas algumas diferenças de rigidez entre provetes. De realçar, o provete 4, que apresenta uma rigidez significativamente menor e uma propagação de fenda mais instável que os restantes, o que pode ser explicado por não se ter conseguido preencher com adesivo de forma uniforme o provete, resultando assim, em zonas em que houve adesivo insuficiente, como se pode ver na Figura 105, o que pode ter condicionado o comportamento do provete.

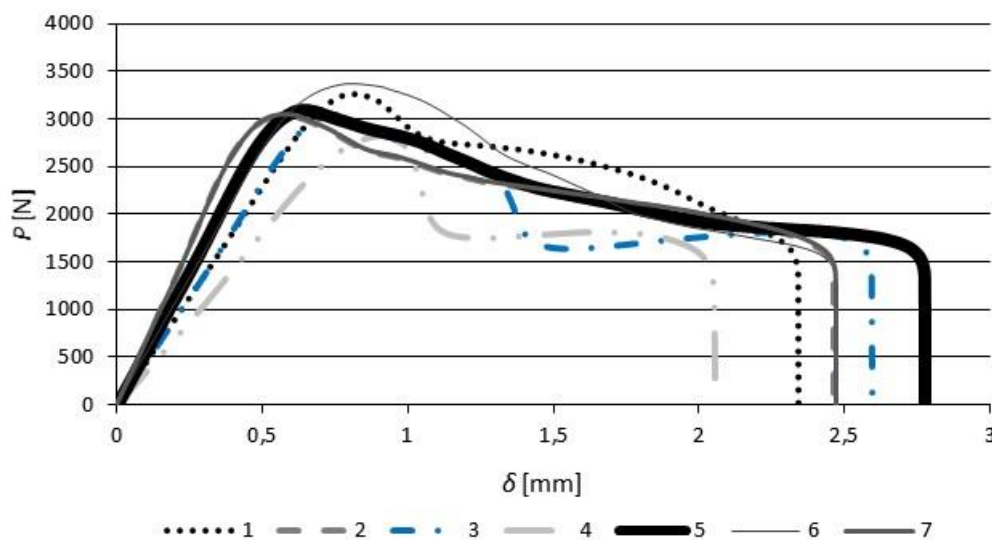


Figura 104 - Curvas P - δ do adesivo SikaForce® 7752

São apresentados na Tabela 18 os valores de força máxima e de deslocamento de rotura obtidos experimentalmente com o adesivo SikaForce® 7752.



Figura 105 – Zona onde ocorreu falta de preenchimento no provete 4 do adesivo SikaForce® 7752

Tabela 18– Valores de força máxima e de deslocamento de rotura registados nos ensaios com o adesivo SikaForce® 7752

Provete	Força máxima [N]	Deslocamento de rotura [mm]
1	3257,26	2,34
2	3050,99	2,47
3	3045,17	2,59
4	2827,18	2,06
5	3099,43	2,77
6	3375,61	2,47
7	3050,99	2,47
Média	3100,95	2,45
Desvio Padrão	161,66	0,20

Pela análise da Tabela 18 percebe-se que os resultados dos provetes foram consistentes, já que o desvio padrão tanto da força máxima ($\approx 5\%$) como do deslocamento máximo ($\approx 8\%$) foram relativamente pequenos. Contudo, a existência deste pequeno desvio pode ser explicada pelos resultados abaixo da média do provete 4, pelo que se pode concluir que falta de preenchimento condiciona o comportamento de uma junta adesiva.

São apresentadas na Figura 106 e na Figura 107 as curvas- R de G , G_I e G_{II} dos provetes 1 e 6, respetivamente, que foram consideradas representativas da totalidade dos ensaios realizados com este adesivo.

As curvas- R do adesivo SikaForce® 7752 foram mais estáveis que as registadas nos outros adesivos, fruto da propagação mais estável da fenda neste adesivo. Também foi possível identificar um patamar na maioria dos provetes, exceto no provete 4 que possivelmente devido à sua falta de preenchimento, teve uma curva- R bastante irregular, o que significa que a rotura adesiva não permitiu que ocorresse uma propagação de fenda estável. Por outro lado, o provete 7, que apesar de ter tido uma curva- R estável, nunca chegou a estabilizar o valor G , G_I e G_{IC} .

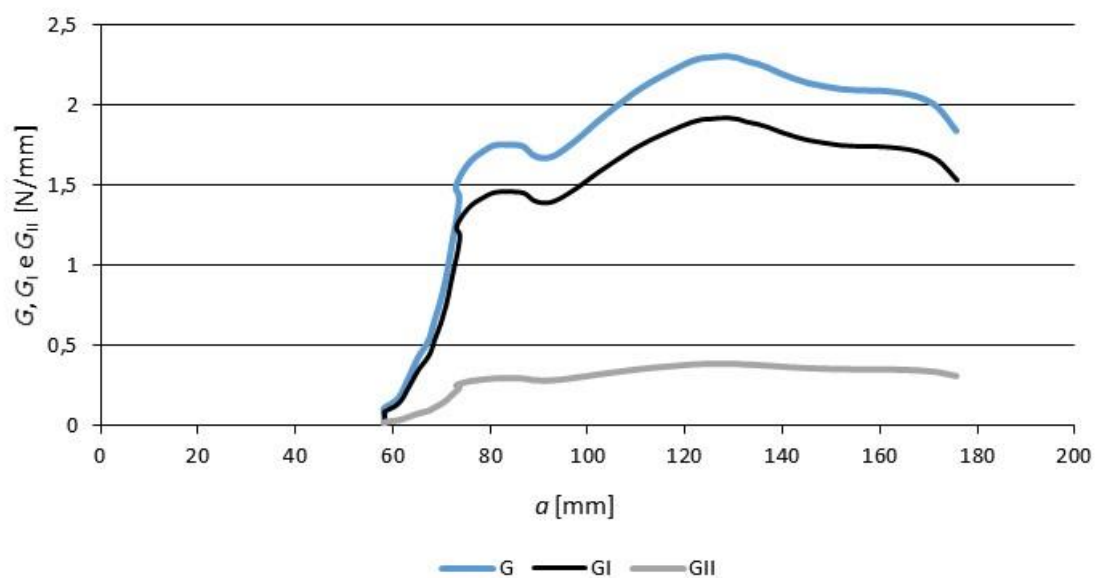


Figura 106 - Curvas- R do provete 1 do adesivo SikaForce® 7752

Por análise do desvio padrão, demonstrado na Tabela 19, que foi de $\approx 9\%$ para G , G_I e G_{IC} , percebe-se que os valores obtidos nos ensaios com o adesivo SikaForce® 7752 foram um pouco dispersos, o que pode ser explicado pela maior dificuldade em identificar um patamar nas curvas- R obtidas nos provetes 4 e 7.

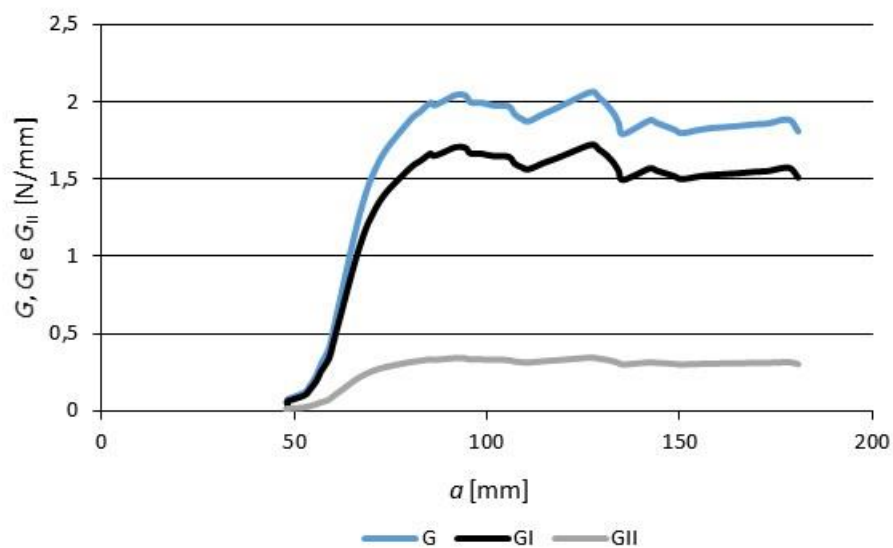


Figura 107 - Curvas-R do provete 6 do adesivo SikaForce® 7752

Tabela 19 – Valores de G , G_I e G_{II} dos ensaios com o adesivo SikaForce® 7752

Provette	G [N/mm]	G_I [N/mm]	G_{II} [N/mm]
1	2,091	1,745	0,346
2	2,460	2,053	0,407
3	2,312	1,930	0,382
4	1,857	1,549	0,308
5	2,166	1,807	0,359
6	1,988	1,659	0,329
7	2,332	1,946	0,386
Média	2,172	1,813	0,360
Desvio Padrão	0,196	0,163	0,032

Pela análise do envelope de fratura experimental do adesivo SikaForce® 7752 apresentada na Figura 108, percebe-se a dispersão dos valores de G_I e G_{II} que não permite que os pontos se localizem todos num determinado ponto do envelope. Contudo, todos os pontos estão claramente mais próximos do mesmo critério de modo

misto dos adesivos anteriores, sendo assim, o critério $\frac{1}{2}$ é o critério mais adequado para descrever o comportamento misto do adesivo SikaForce® 7752.

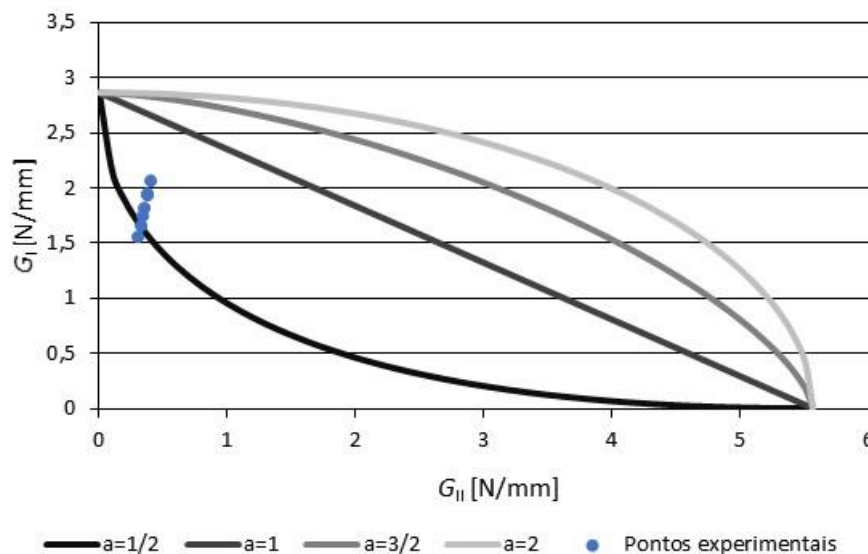


Figura 108 – Envelope de fratura experimental do adesivo SikaForce® 7752

3.1.5.4 Análise dos resultados obtidos

Pela análise dos resultados obtidos nos ensaios dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 foi possível retirar algumas conclusões. Apenas um provete foi considerado inválido, o que significa que houve precisão nos resultados obtidos. Todos os adesivos tiveram curvas $P-\delta$ bastante similares entre provetes do mesmo adesivo, com poucos provetes a destacar-se, o que indica houve repetibilidade dos ensaios e que os ensaios foram bem preparados. Ter havido apenas um caso de falta de preenchimento do provete indica também que a colagem e preparação da superfície dos aderentes foi, de forma geral, bem executada.

As curvas $P-\delta$ foram mais instáveis no adesivo Araldite® AV138 e mais estáveis no adesivo SikaForce® 7752, o que mostra uma maior fragilidade do adesivo conduz a uma maior instabilidade na propagação da fenda. Conclusões idênticas foram obtidas nos trabalhos de Constante et al. [102] e Santos et al. [103].

Na Tabela 20 pode-se observar que o adesivo SikaForce® 7752 é o adesivo em que mais força é necessária para fraturar a junta e é aquele que atinge um maior deslocamento de rotura, já o adesivo Araldite® AV138 foi aquele que registou os menores valores em ambos os casos. Isto significa que um adesivo mais dúctil, para além de suportar uma maior deformação, como se esperaria por ter essa característica, também é aquele que suporta uma carga maior até rotura.

Tabela 20 – Média da força máxima e deslocamento de rotura de cada adesivo

Adesivo	Força máxima [N]	Deslocamento de rotura [mm]
Araldite® AV138	1067,04	0,67
Araldite® 2015	2185,47	1,35
SikaForce® 7752	3100,95	2,45

As curvas-*R* também apresentaram uma boa repetibilidade e na maioria foi possível registar um intervalo em que a fenda propagou de forma estável. Desta forma foi possível, identificar o valor de G , G_I e G_{II} do ensaio.

Tabela 21 – Média dos valores de G registada em cada adesivo

Adesivo	G [N/mm]	G_I [N/mm]	G_{II} [N/mm]
Araldite® AV138	0,118	0,099	0,019
Araldite® 2015	0,505	0,422	0,083
SikaForce® 7752	2,172	1,813	0,360

Da análise da Tabela 21 percebe-se, como seria de esperar, que o adesivo mais dúctil, o adesivo SikaForce® 7752, foi aquele que precisou de maiores valores de G , G_I e G_{II} para a fenda se propagar. Já o adesivo Araldite® AV138, sendo o mais frágil, foi o que atingiu valores menores de G , G_I e G_{II} .

Houve uma ligeira dispersão dos pontos nos envelopes de fratura do adesivo SikaForce® 7752 e uma muito baixa dispersão nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Contudo, em todos os casos foi possível, de forma clara, identificar o critério de modo misto mais adequado para descrever o comportamento de cada adesivo, o critério $\frac{1}{2}$ foi o escolhido para os três adesivos.

3.2 Trabalho numérico

A simulação dos ensaios foi realizada recorrendo ao *software* Abaqus®, que é um *software* que se baseia no método de elementos finitos e inclui um módulo integrado de modelo de dano coesivo para simular os comportamentos de juntas adesivas.

As geometrias dos provetes foram construídas importando um *sketch* realizado no *software* SolidWorks® com o formato do aderente TDCB, enquanto que o aderente DCB foi construído a partir desse mesmo formato aplicando as alterações necessárias.

3.2.1 Condições da análise numérica

A modelação das juntas foi efetuada em 2D. Para simular o comportamento dos diferentes materiais (aço e adesivo), os aderentes foram modelados como elementos bilineares sólidos de 4 nós em estado plano de tensão quadrilateral (CPE4 do Abaqus®) e o adesivo como um elemento coesivo bidimensional de 4 nós (COH2D4 do Abaqus®). Na Figura 109 pode-se ver o refinamento geral aplicado na simulação dos provetes.

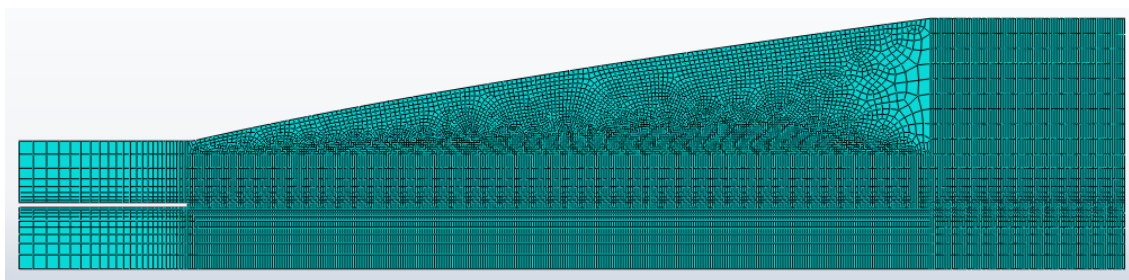


Figura 109 - Refinamento geral da malha do provete simulado

Foi aplicado um maior refinamento no adesivo e nas superfícies dos aderentes que estão em contacto com o adesivo, como se pode ver em detalhe na Figura 110, visto serem as zonas onde se desenvolverão os maiores gradientes de tensão. Nessas zonas foram aplicados elementos com um comprimento de aproximadamente 0,5 mm. No adesivo foi considerada apenas 1 elemento ao longo da sua espessura, pelo que as dimensões dos elementos do adesivo apresentam as dimensões aproximadas de $0,5 \times 1,0 \text{ mm}^2$.

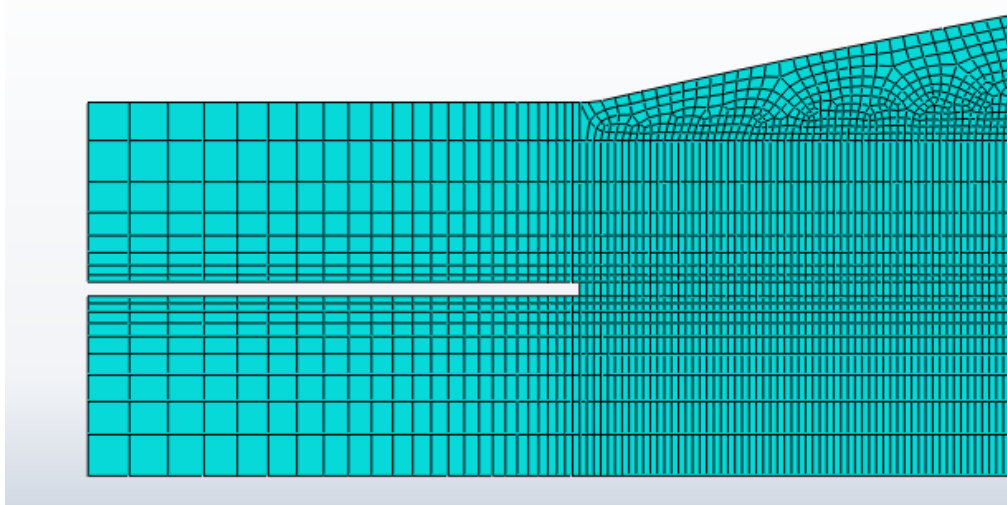


Figura 110 – Detalhe do maior refinamento do adesivo e zona circundante em comparação à zona de pré-fenda

Verticalmente foi aplicado uma gradação do tamanho dos elementos de malha (efeito *bias*), aplicando um tamanho máximo de 3 mm e mínimo de 0,5. Este efeito também foi aplicado horizontalmente nos aderentes nas partições na zona da pré-fenda.

Na zona inclinada do aderente TDCB, como se pode ver na Figura 111, foi aplicada uma malha não estruturada, com elementos de aproximadamente 1 mm na aresta superior e de 3 mm verticalmente na extremidade direita.

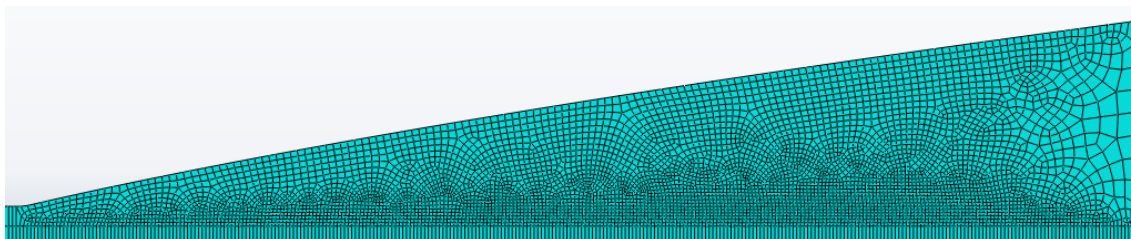


Figura 111 - Detalhe da malha não estruturada na zona inclinada do aderente TDCB

O objetivo de aplicar diferentes tamanhos nos elementos de malha, e o efeito *bias*, é diminuir o esforço computacional e assim reduzir o tempo de simulação sem comprometer as zonas de maior gradiente de tensão.

Em relação às condições fronteira (Figura 112), estas consistiram em restringir o deslocamento, em ambas as direções, do nó na extremidade inferior esquerda do aderente DCB, e apenas restringir o deslocamento horizontal do nó na extremidade superior esquerda do aderente TDCB e permitir o seu deslocamento vertical.

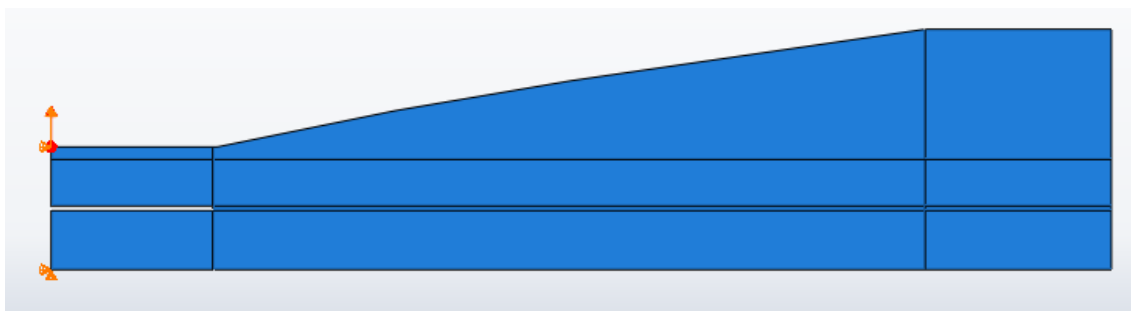


Figura 112 – Condições fronteira aplicadas aos modelos ATDCB

3.2.2 Modelos de dano coesivo

3.2.2.1 Modelo de dano coesivo triangular

Em função do comportamento do material ou interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter os resultados mais precisos [22]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos vários modelos, dos quais se destacam o triangular [70], linear parabólico [71], exponencial [73], polinomial [72] e trapezoidal [92]. A lei triangular é a mais utilizada devido à sua simplicidade, pelo

reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [104]. Nesta lei são distinguidos dois modos. O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respectivo são anulados na lei coesiva respectiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tração e corte [88]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente normal de deformação e de uma de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões de membrana são desprezadas.

Está representado na Figura 113 o modelo triangular 2D implementado no *software* de simulação ABAQUS®, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro e a lei de menores dimensões representa a lei de modo misto.

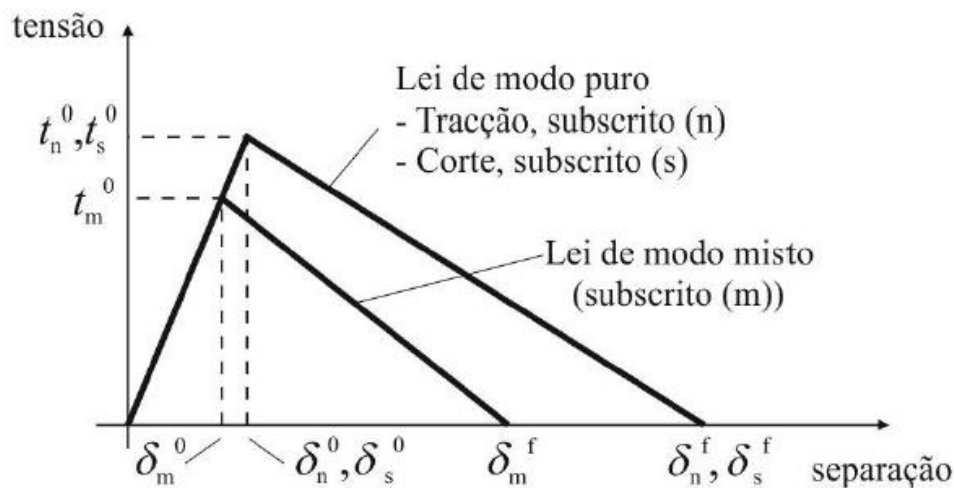


Figura 113 - Lei coesiva triangular do MDC implementado no *software* de simulação ABAQUS®

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz \mathbf{K}_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (28)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja considerada uma formulação local, usada para simular fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [105]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0, \quad (29)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [88]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1, \quad (30)$$

onde $\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [94]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 113), pela igualdade da equação (30), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 113) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (31)$$

3.2.3 Validação das leis coesivas

Neste capítulo é efetuada a análise e validação das leis coesivas aplicadas nas simulações numéricas nos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Para validar a aplicação das leis coesivas são apresentadas comparações entre os valores de força máxima, deslocamento de rotura e da taxa de libertação de energia de deformação obtidos numericamente relativamente aos valores obtidos experimentalmente. São também apresentados gráficos representativos das curvas $P-\delta$ e das curvas- R obtidas numericamente e experimentalmente para análise da reprodução do comportamento do adesivo.

Nas simulações numéricas, como os valores obtidos experimentalmente não correspondem às taxas de libertação de energia de deformação em modo puro, foram considerados valores G_{IC} e de G_{IIC} obtidos em trabalhos anteriores. Também para uma melhor reprodução das condições experimentais foi aplicado um α_0 em cada provete correspondente ao α_0 desse provete aplicado experimentalmente.

3.2.3.1 Araldite® AV138

Na Tabela 24 estão representados os valores de força máxima e de deslocamento de rotura registados numericamente nas simulações com o adesivo Araldite® AV138 e respetiva variação em relação aos valores registados experimentalmente.

Tabela 22 - Valores de força máxima e deslocamento de rotura do adesivo Araldite® AV138 registados numericamente e variação em relação aos respetivos valores registados experimentalmente

Provete	P [N]	Var (%)	δ [mm]	Var [%]
1	945,93	- 3,74	1,27	+ 100,63
2	1103,70	+ 5,82	1,27	+ 92,42
3	1084,50	+ 1,91	1,27	+ 81,43
4	1282,10	+ 12,31	1,27	+ 108,20
5	1256,40	+ 16,49	1,27	+ 84,06
6	953,70	+ 1,11	1,27	+ 71,62
7	1272,10	+ 4,61	1,27	+ 92,42
Média	1128,35	+ 5,75	1,27	+ 89,43
Desvio Padrão	134,70		0	

De uma forma geral, foram registadas variações dos valores de força máxima muito baixas em relação aos valores obtidos experimentalmente, sendo os provetes 4 (+12,31%) e 5 (+16,49%) as exceções. Nestes dois casos, as simulações numéricas atingiram picos de força significativamente superiores aos experimentais, podendo evidenciar que ocorreu uma rotura precoce nos ensaios experimentais desses provetes. De forma inesperada, foi obtido um valor do desvio padrão superior ao registado experimentalmente. O elevado valor de desvio padrão (11,94%) obtido numericamente é resultado da elevada variedade de valores de σ_0 aplicados, enquanto experimentalmente a eventual rotura precoce dos provetes 4 e 5 parece ter contribuído para uma uniformização dos resultados.

Em relação aos valores de deslocamento de rotura, estes não apresentaram variação entre si, validando a elevada repetibilidade de resultados que se obtém nas simulações numéricas. Relativamente aos valores registados experimentalmente, os valores de deslocamento de rotura obtidos numericamente estiveram perto do dobro, o que já seria de esperar, visto que os provetes usados experimentalmente apresentam sempre defeitos e a máquina de ensaios apresenta erros de medições normais deste tipo de máquinas.

Estão representadas na Figura 114 e na Figura 115 as curvas P - δ dos provetes 3 e 6, respetivamente, que foram consideradas representativas das simulações numéricas.

Também são apresentadas as curvas P - δ experimentais dos respectivos provetes para efeitos de comparação.

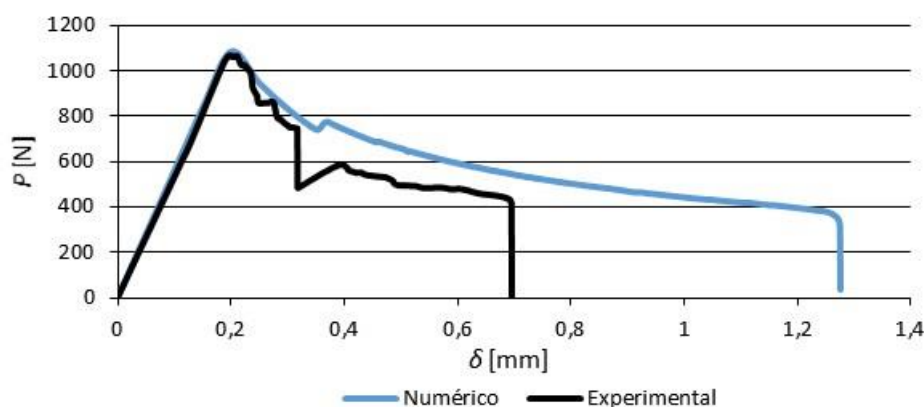


Figura 114 - Curvas P - δ do provete 3 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo Araldite® AV138

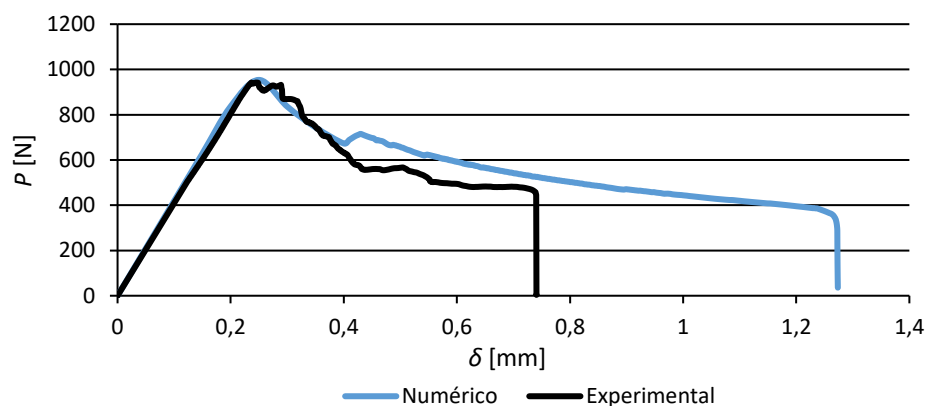


Figura 115 - Curvas P - δ do provete 6 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo Araldite® AV138

Na generalidade dos casos, as simulações numéricas previram de forma correta o comportamento do adesivo, registando um formato bastante idêntico da curva P - δ relativamente aos ensaios experimentais, algo que pode ser comprovado pela observação da Figura 114 e da Figura 115, o que valida o modelo de dano coesivo triangular como sendo o correto para descrever o comportamento do adesivo. Contudo, é de realçar que, como já foi referido no capítulo da análise dos resultados experimentais, as curvas P - δ experimentais apresentam irregularidades durante a propagação da fenda devido a defeitos nos provetes, algo que, naturalmente, não é reproduzido nas simulações numéricas.

Na Tabela 23 são apresentados os valores de G , G_I e G_{II} registados numericamente nas simulações com o adesivo Araldite® AV138 e respetiva variação em relação aos valores experimentais. A variação apresentada é referente aos valores de G , G_I e G_{II} que, como são obtidos através de formulas que os relacionam, é idêntica para todas estas variáveis.

Tabela 23 - Valores de G , G_I e G_{II} do adesivo Araldite® 2015 registados numericamente e variação em relação aos respetivos valores experimentais

Provete	G [N/mm]	G_I [N/mm]	G_{II} [N/mm]	Var [%]
1	0,120	0,100	0,020	+ 1,69
2	0,120	0,099	0,021	+ 5,26
3	0,120	0,100	0,020	- 0,83
4	0,120	0,100	0,020	+ 1,69
5	0,121	0,101	0,020	+ 3,42
6	0,121	0,101	0,020	0,00
7	0,121	0,101	0,020	+ 3,42
Média	0,120	0,100	0,020	+ 2,06
Desvio Padrão	0,0005	0,0007	0,0003	

Foi registada uma excelente repetibilidade entre os valores de G , G_I e G_{II} obtidos numericamente, e também uma excelente reprodução dos resultados experimentais, visto que a maior variação registada foi de apenas + 5,26%. Estes resultados permitem concluir que as leis coesivas aplicadas nas simulações numéricas descrevem com elevada exatidão o comportamento do adesivo.

Estão representadas na Figura 116 e na Figura 117 as curvas- R de G , G_I e G_{II} dos provetes 3 e 6, respetivamente, que foram consideradas representativas das simulações numéricas. Também são apresentadas as curvas- R experimentais dos respetivos provetes para efeitos de comparação.

As curvas- R obtidas numericamente apresentam um formato bastante idêntico às registadas experimentalmente, como se pode observar na Figura 116 e na Figura 117. Contudo, as curvas- R obtidas numericamente apresentam patamares bastante mais estáveis do que as obtidas experimentalmente, consequência da maior estabilidade das curvas P - δ numéricas em relação às experimentais.

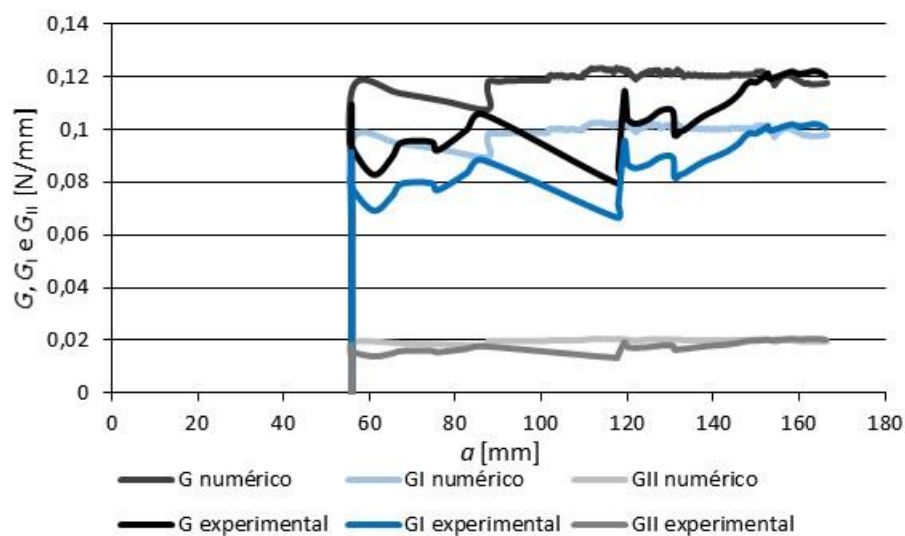


Figura 116 - Curvas-R do provete 3 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo Araldite® AV138

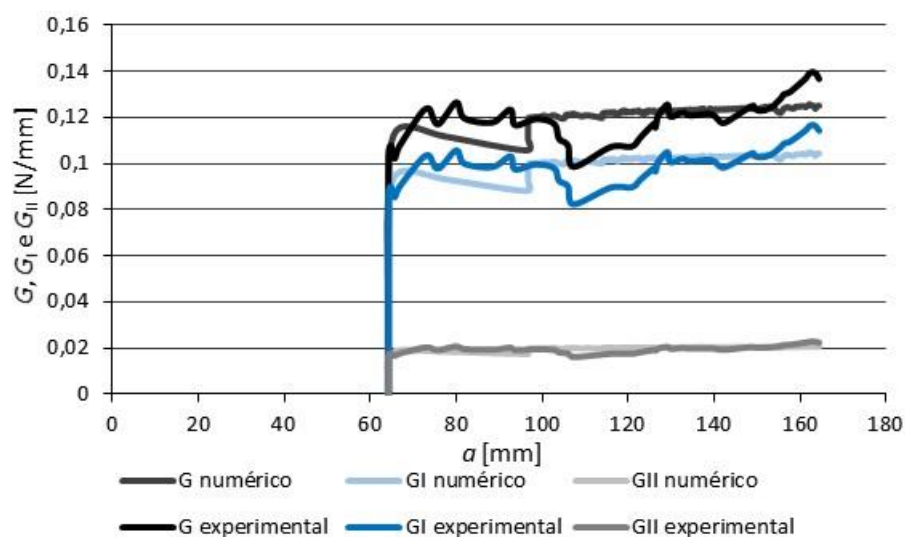


Figura 117 - Curvas-R do provete 6 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo Araldite® AV138

3.2.3.2 Araldite® 2015

Na Tabela 24 são apresentados os valores de força máxima e de deslocamento de rotura registados numericamente nas simulações com o adesivo Araldite® 2015 e respetiva variação em relação aos valores registados experimentalmente.

Tabela 24 - Valores de força máxima e deslocamento de rotura do adesivo Araldite® 2015 registados numericamente e variação em relação aos respetivos valores registados experimentalmente

Provete	P [N]	Var (%)	δ [mm]	Var [%]
1	2337,00	+ 1,10	2,53	+ 93,13
2	2222,70	- 0,35	2,53	+ 80,71
3	2084,20	+ 33,17	2,53	+ 104,03
4	2276,60	-4,12	2,53	+ 136,45
5	2294,40	-1,65	2,53	+ 65,36
7	2261,20	-1,61	2,53	+ 65,36
Média	2246,02	+ 2,77	2,53	+ 87,87
Desvio Padrão	80,12		0	

Pela análise da Tabela 24 pode-se observar que, com a exceção do provete 3, as simulações numéricas conseguem prever de forma muito aproximada os valores de força máxima. O valor de força relativamente baixo que o provete 3 registou experimentalmente, e que se traduziu numa variação de 33,17% para o valor numérico, pode ser resultado de defeitos no provete o que levou à sua fratura precoce. Relativamente aos valores de deslocamento, observa-se que todos deram bastante acima relativamente aos valores registados experimentalmente, o que se pensa ser devido a defeitos experimentais que afetaram os respetivos valores. Analisando os desvios padrão também se percebe que os ensaios numéricos foram bastante mais precisos, sendo que relativamente aos valores de deslocamento a variação foi praticamente nula, da ordem das centésimas, algo que já seria de esperar visto que experimentalmente existe uma variabilidade natural no processo de fabrico e ensaio, o que não acontece nas simulações numéricas.

São apresentadas na Figura 118 e na Figura 119 as curvas P - δ dos provetes 1 e 2, respetivamente, que foram consideradas representativas das simulações numéricas, e também são apresentadas as curvas P - δ experimentais dos respetivos provetes para posterior comparação.

De forma geral as curvas P - δ registadas numericamente e experimentalmente apresentam um formato bastante idêntico o que comprova que o modelo de dano coesivo triangular é o modelo apropriado para descrever o comportamento do adesivo

Araldite® 2015, sendo a Figura 118 e Figura 119 bons exemplos disso. A rigidez inicial registrada também foi bastante idêntica. Relativamente ao comportamento após o valor de pico de força, também apresentam comportamentos idênticos, contudo, os provetes 1, como se pode ver na Figura 118, e 4 apresentam uma diminuição de força consideravelmente mais acentuada, o que pode ser resultado de defeitos presentes nesses provetes.

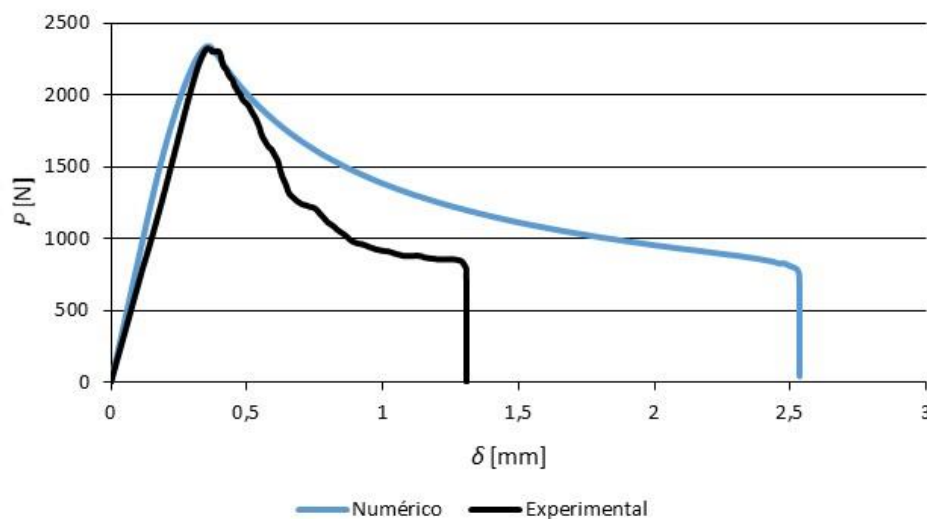


Figura 118 - Curvas P - δ do provete 1 registradas numericamente e experimentalmente com adesivo Araldite® 2015

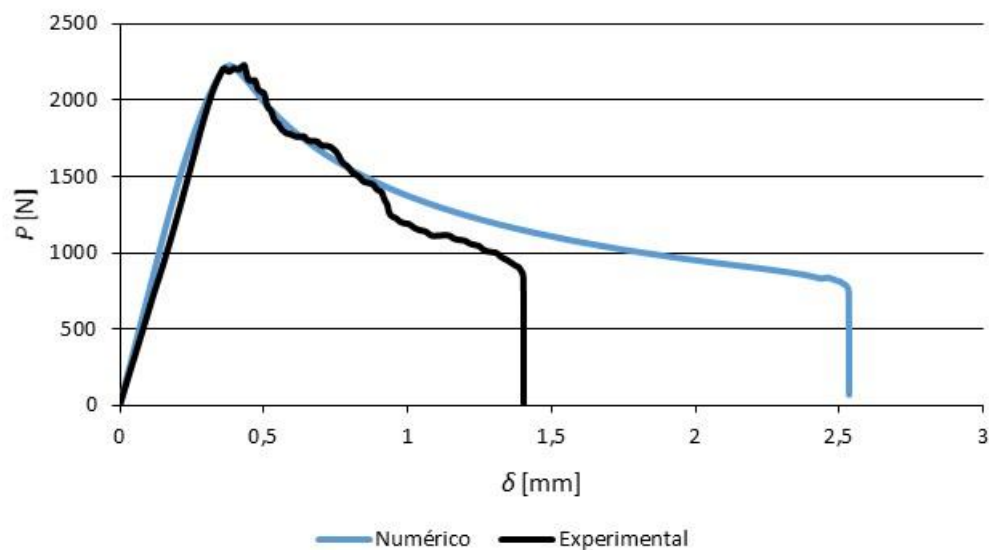


Figura 119 - Curvas P - δ do provete 2 registradas numericamente e experimentalmente com adesivo Araldite® 2015

Na Tabela 25 são apresentados os valores de G , G_I e G_{II} registrados numericamente nas simulações com o adesivo Araldite® 2015 e respectiva variação em relação aos valores registrados experimentalmente.

Tabela 25 - Valores de G , G_I e G_{II} do adesivo Araldite® 2015 registados numericamente e variação em relação aos respetivos valores registados experimentalmente

Provete	G [N/mm]	G_I [N/mm]	G_{II} [N/mm]	Var [%]
1	0,506	0,422	0,084	- 1,94
2	0,522	0,436	0,086	+ 3,37
3	0,518	0,432	0,086	+ 4,02
4	0,504	0,420	0,084	- 2,51
5	0,504	0,420	0,084	- 0,40
7	0,503	0,420	0,083	+ 2,86
Média	0,510	0,425	0,085	+ 0,086
Desvio Padrão	0,008	0,007	0,001	-22,43

Por análise da Tabela 25 percebe-se que os valores de G , G_I e G_{II} obtidos numericamente foram bastante próximos dos obtidos experimentalmente, já que a variação máxima não atinge os 5%. Isto significa que as leis coesivas idealizadas para este adesivo conseguem reproduzir fielmente o comportamento experimental. Dos baixos valores de desvio padrão, face aos valores experimentais, pode-se concluir que as simulações numéricas foram bastante mais precisas, embora este facto também pode ser consequência de as curvas- R numéricas apresentarem patamares mais estáveis e mais facilmente identificáveis do que as experimentais.

São apresentadas na Figura 120 e na Figura 121 as curvas- R de G , G_I e G_{II} dos provetes 1 e 2, respetivamente, que foram consideradas representativas das simulações numéricas. Também são apresentadas as curvas- R experimentais dos respetivos provetes para efeitos de comparação.

As curvas- R obtidas numericamente com o adesivo Araldite® 2015, tal como as curvas P - δ , também foram bastante mais estáveis do que as experimentais, contudo apresentam um formato e valores de patamar bastante aproximados.

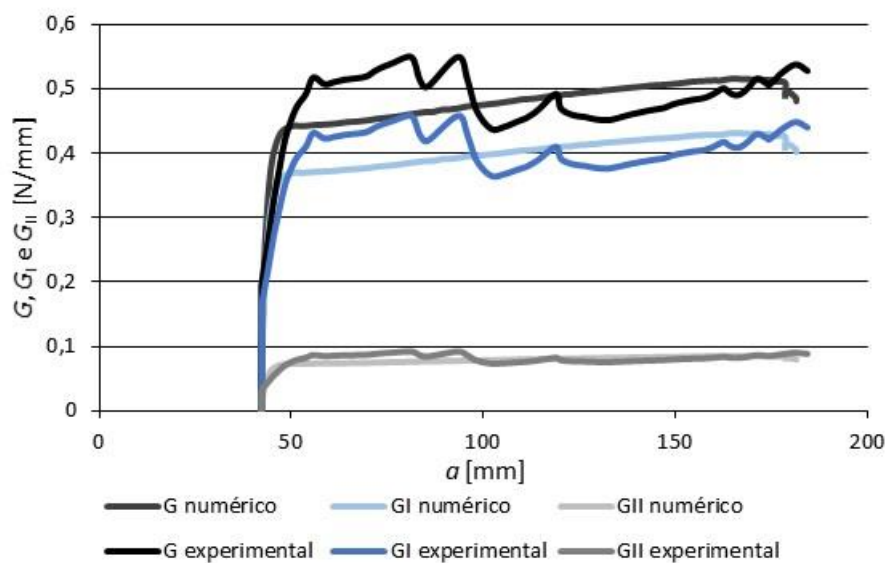


Figura 120 – Curvas-R do provete 1 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo Araldite® 2015

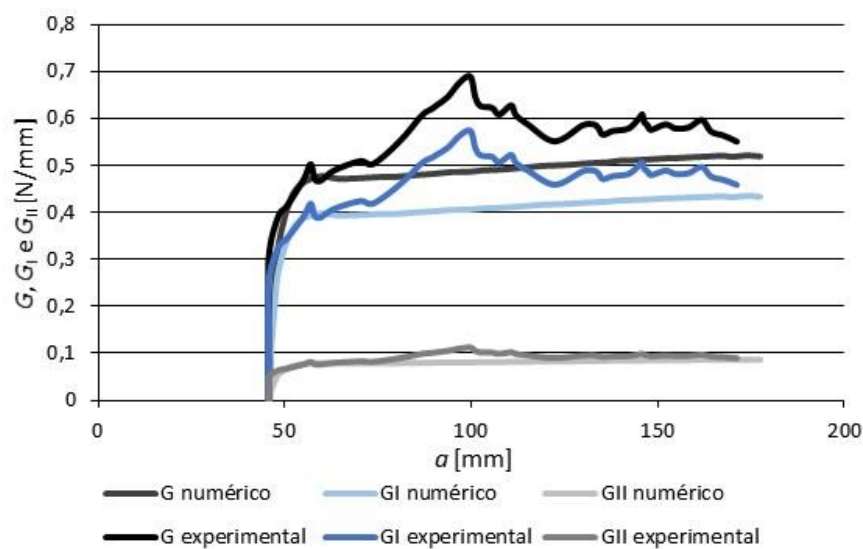


Figura 121 - Curvas-R do provete 2 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo Araldite® 2015

3.2.3.3 SikaForce® 7752

Na Tabela 26 são apresentados os valores de força máxima e de deslocamento de rotura registados numericamente nas simulações com o adesivo SikaForce® 7752 e respetiva variação em relação aos valores registados experimentalmente.

Tabela 26 – Valores de força máxima e de deslocamento de rotura do adesivo SikaForce® 7752 registados numericamente e variação em relação aos respetivos valores registados experimentalmente

Provete	P [N]	Var (%)	δ [mm]	Var (%)
1	3189,40	- 2,08	5,16	+ 120,6
2	3361,04	+ 10,16	5,16	+ 109,70
3	3233,97	+ 6,20	5,16	+ 99,38
4	3545,73	+ 25,42	5,16	+ 150,63
5	3255,01	+ 5,02	5,16	+ 86,39
6	3505,32	+ 3,84	5,16	+ 109,07
7	3828,29	+ 25,48	5,16	+ 109,03
Média	3416,97	+ 10,19	5,16	+ 110,5
Desvio Padrão	209,83		0,00	

De forma geral o valor máximo de força das simulações numéricas varia pouco em relação aos valores experimentais. No entanto, os provetes 4 e 7 obtiveram um valor bastante superior ao experimental. No caso do provete 4 este comportamento já era de esperar visto o provete ter sofrido rotura adesiva e, assim, ter visto o seu desempenho diminuído. Em relação ao provete 7 esta diferença pode significar que houve rotura prematura do adesivo. Os valores de força máxima, ao contrário do que é normal, apresentam um desvio padrão superior ao registado experimentalmente. Relativamente aos valores de deslocamento de rotura, os modelos numéricos apresentaram uma variação praticamente nula entre si e um valor bastante superior aos experimentais, o que é normal, visto que numericamente não os provetes não apresentam os defeitos que estão presentes experimentalmente, como já referido anteriormente.

São representadas na Figura 122 e na Figura 123 as curvas P - δ dos provetes 5 e 6, respetivamente, que foram consideradas representativas das simulações numéricas, e também são apresentadas as curvas P - δ experimentais dos respetivos provetes para comparação.

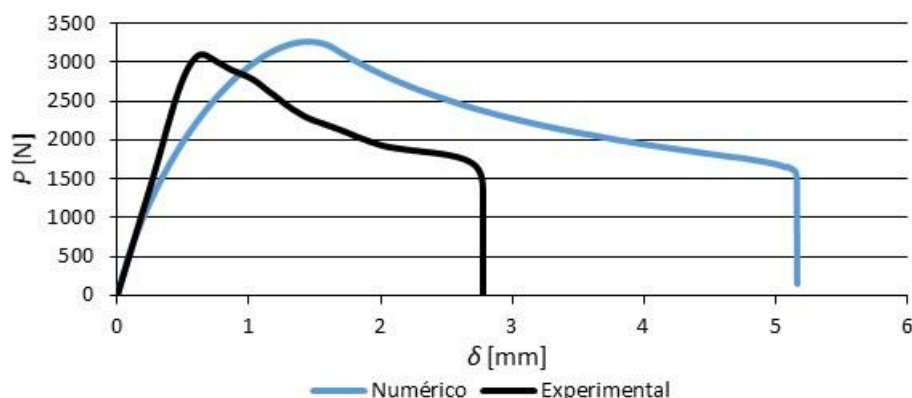


Figura 122 - Curvas P - δ do provete 5 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo SikaForce® 7752

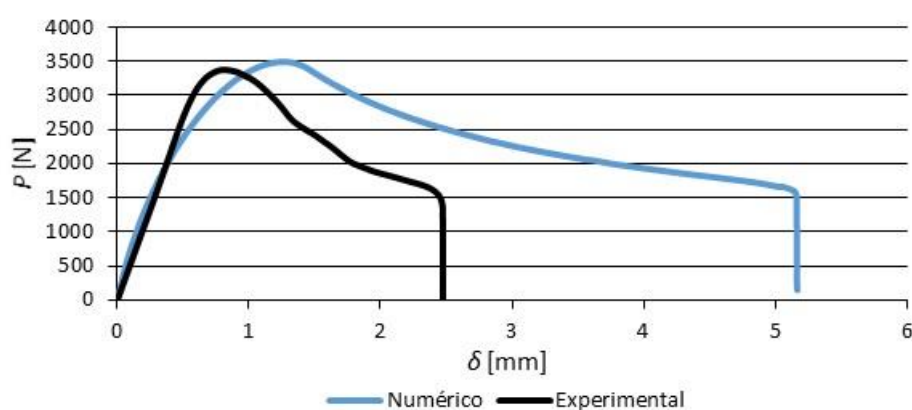


Figura 123 - Curvas P - δ do provete 6 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo SikaForce® 7752

As curvas P - δ registadas nas simulações numéricas apresentam, de forma geral, um formato idêntico às registadas nos ensaios experimentais. Contudo, é de notar que as simulações numéricas não previram de forma exata a rigidez do adesivo instantes antes de ser atingida a força máxima, já que nesta zona da curva P - δ a rigidez é inferior ao registado experimentalmente. Considera-se que esta diferença ocorre devido à utilização de uma lei coesiva triangular, que assume amaciamento de tensões imediatamente após a iniciação do dano (perda de linearidade entre a tensão e deslocamento), quando na realidade, para este adesivo se observa idealmente um patamar de tensões de extensão significativa. Esta diferença depois reflete-se na zona de propagação da fenda.

Na Tabela 27 são apresentados os valores de G , G_I e G_{II} registados numericamente nas simulações com o adesivo SikaForce® 7752 e respetiva variação em relação aos valores registados experimentalmente.

Tabela 27 - Valores de G , G_I e G_{II} do adesivo SikaForce® 7752 registados numericamente e variação em relação aos respetivos valores registados experimentalmente

Provete	G [N/mm]	G_I [N/mm]	G_{II} [N/mm]	Var [%]
1	2,909	2,428	0,481	+ 39,12
2	2,933	2,448	0,485	+ 19,23
3	2,932	2,448	0,484	+ 26,82
4	2,938	2,455	0,483	+ 58,21
5	2,942	2,455	0,487	+ 35,83
6	2,933	2,447	0,485	+ 47,54
7	2,932	2,447	0,485	+ 25,73
Média	2,931	2,447	0,484	+ 34,24
Desvio Padrão	0,010	0,009	0,002	

Observa-se na Tabela 27 que os valores G , G_I e G_{II} obtidos numericamente foram significativamente mais elevados do que os registados experimentalmente, esta diferença é resultado de ter sido aplicada uma lei coesiva triangular que, como já se verificou anteriormente, não descreve de forma exata o comportamento do adesivo. Contudo, também se pode observar, que foram bastante próximos entre si, como se pode constatar pelo reduzido desvio padrão.

São representadas na Figura 124 e na Figura 125 as curvas- R de G , G_I e G_{II} dos provetes 5 e 6, respetivamente, que foram consideradas representativas das simulações numéricas e também são apresentadas as curvas- R experimentais dos respetivos provetes para posterior comparação.

As curvas- R numéricas apresentam uma curvatura bastante mais acentuada na zona inicial, sendo consequência da menor rigidez que foi registada nas simulações numéricas. Na zona da propagação de fenda as curvas- R apresentam um patamar que não é constante, já que os valores diminuem progressivamente e de forma ligeira, e também se pode observar que este patamar é localizado num valor de G significativamente superior ao das curvas- R experimentais. Estas diferenças entre as curvas- R numéricas e experimentais resultam da aplicação de uma lei coesiva triangular, que, como explicado anteriormente, não descreve corretamente o comportamento do adesivo.

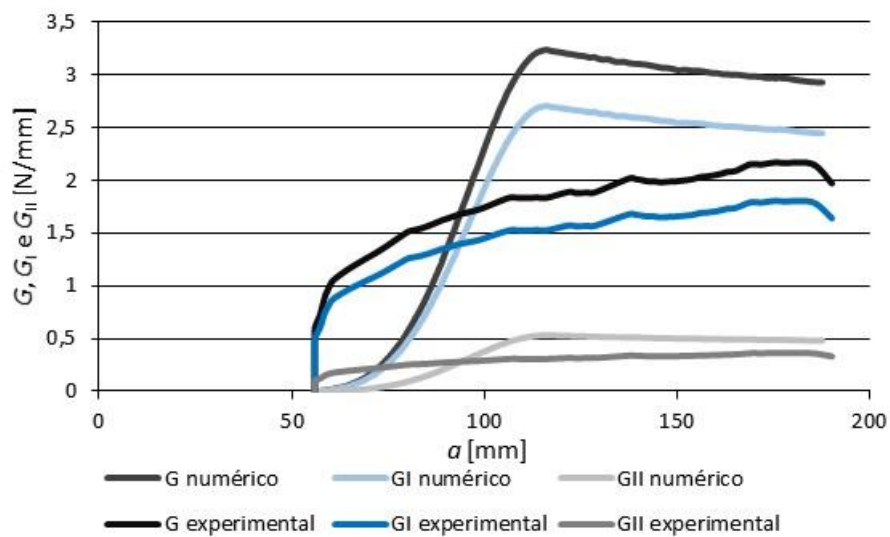


Figura 124 - Curvas-R do provete 5 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo SikaForce® 7752

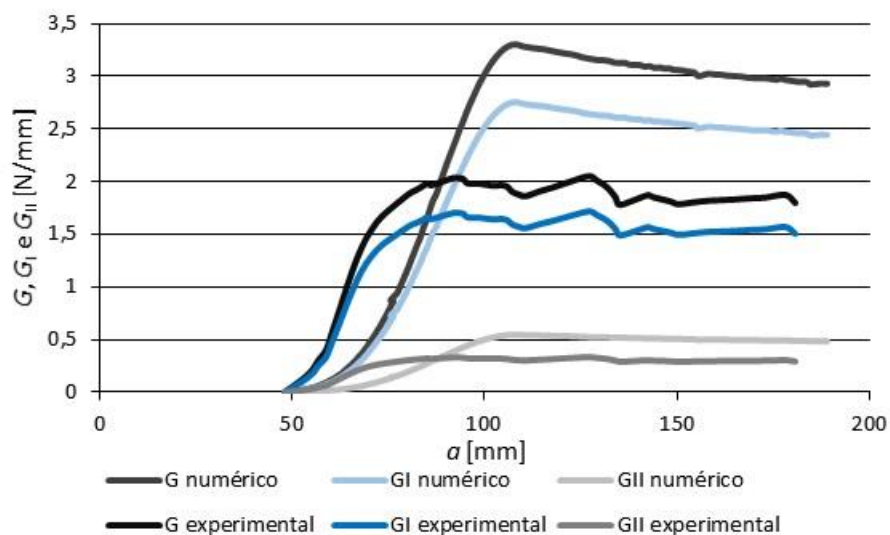


Figura 125 - Curvas-R do provete 6 registadas numericamente e experimentalmente com adesivo SikaForce® 7752

3.2.4 Validação dos critérios de propagação

Neste capítulo são analisados os envelopes de fratura numéricos de cada adesivo. Nas simulações numéricas foi utilizado para cada adesivo o respetivo critério de propagação em modo misto obtido experimentalmente, sendo que neste caso foi aplicado o critério $\frac{1}{2}$ em todos os adesivos. A análise destes envelopes de fratura numéricos servirá para validar ou invalidar os critérios de propagação em modo misto aplicados para a utilização posterior na previsão de resistência de juntas adesivas de diferentes geometrias.

3.2.4.1 Araldite® AV138

Está representado na Figura 126 o envelope de fratura obtido numericamente com o adesivo Araldite® AV138. O envelope demonstra uma dispersão muito baixa de pontos numéricos, e que estes pontos estão posicionados num ponto muito próximo ao que foi obtido experimentalmente. Estes dois factos, para além de validar o critério $\frac{1}{2}$ de propagação em modo misto como o critério ideal para o adesivo Araldite® 2015, também validam as condições aplicadas nas simulações numéricas, visto que estas conseguiram reproduzir com elevada exatidão os valores obtidos experimentalmente.

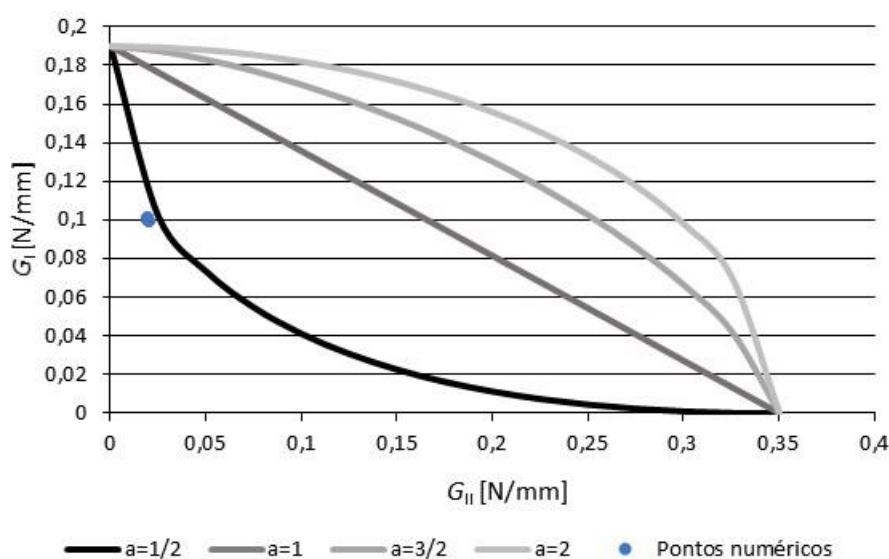


Figura 126 - Envelope de fratura numérico do adesivo Araldite® AV138

3.2.4.2 Araldite® 2015

É apresentado na Figura 128 o envelope de fratura obtido numericamente com o adesivo Araldite® 2015. O envelope de fratura do adesivo Araldite® 2015 também apresenta uma dispersão muito baixa dos pontos, e um posicionamento desses pontos muito idêntica aos obtidos experimentalmente. O posicionamento dos pontos tangente à curva que representa o critério de propagação em modo misto $\frac{1}{2}$ validam este critério como o ideal para representar o comportamento do adesivo Araldite® 2015. Também a excelente reprodução dos resultados experimentais permite concluir que as condições aplicadas nas simulações numéricas, foram de facto adequadas para simular o comportamento do adesivo.

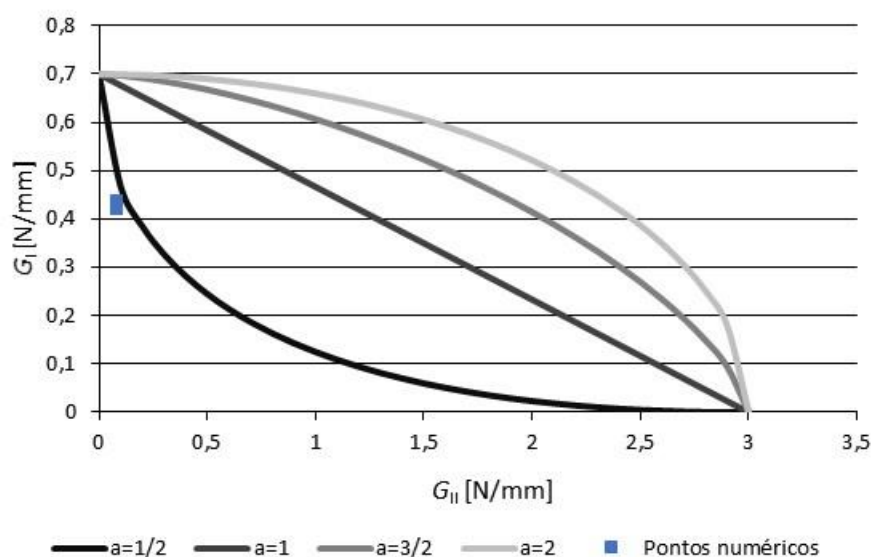


Figura 127 – Envelope de fratura numérico do adesivo Araldite® 2015

3.2.4.3 SikaForce® 7752

É representado na Figura 128 o envelope de fratura obtido numericamente com o adesivo SikaForce® 7752. A análise do envelope de fratura permite observar que houve uma dispersão muito reduzida dos pontos numéricos. Contudo, o posicionamento dos pontos mais perto da curva representativa do critério 1 de propagação em modo misto invalida a utilização do critério $\frac{1}{2}$ de propagação em modo misto. Este facto pode-se explicar pela escolha de um modelo de dano coesivo triangular que, como já se viu nas curvas $P-\delta$, não é o mais adequado para descrever o comportamento mais dúctil deste adesivo. Estas alterações no comportamento do adesivo podem ter resultados em valores de G_I e G_{II} inflacionados, algo que também já se observou nas curvas- R do adesivo. No entanto, como se observa no envelope de fratura, embora os pontos estejam mais perto da curva representativa do critério 1, os pontos localizam-se entre a curva 1 e $\frac{1}{2}$, e a distância até estas curvas não difere muito, pelo que uma pequena alteração dos valores pode alterar o posicionamento dos pontos e assim alterar o critério de propagação em modo misto.

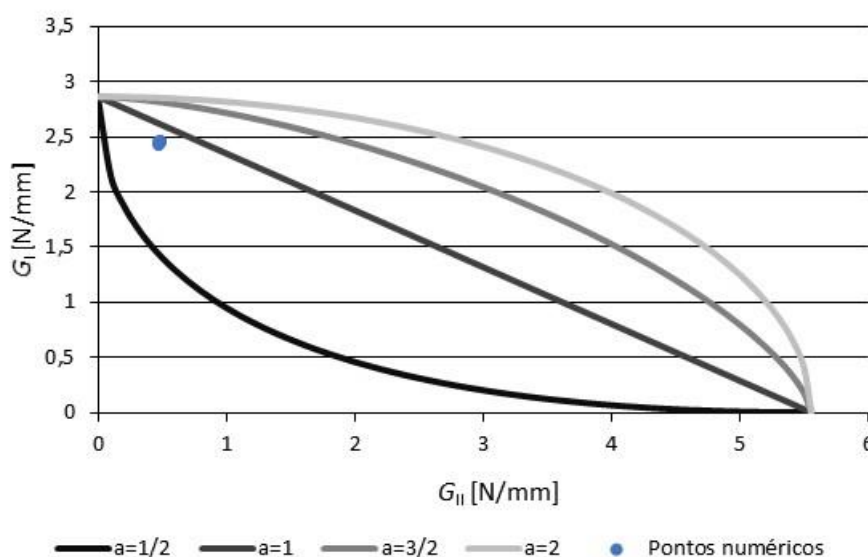


Figura 128 – Envelope de fratura numérico do adesivo SikaForce® 7752

3.2.5 Análise de sensibilidade às leis coesivas obtidas

No trabalho numérico os parâmetros G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 foram obtidos através de trabalhos anteriores. Neste capítulo é analisada a influência destes parâmetros no desempenho de cada adesivo. Para isso foram construídas, por simulação numérica, curvas $P-\delta$ para as variações -50%, -25%, 0%, +25% e 50% para cada parâmetro individualmente e combinados, e analisada de seguida a sensibilidade do adesivo às variações destes parâmetros. Na construção dos provetes foi aplicado um $a_0 = 45$ mm, escolhido por ser um valor próximo ao testados experimentalmente e numericamente.

3.2.5.1 Araldite® AV138

Pela análise da Figura 129, que representa a influência do parâmetro G_{IC} nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® AV138, percebe-se que parâmetro não altera a rigidez do adesivo, contudo, altera significativamente os valores de força máxima e de deslocamento de rotura, sendo que estes valores são tanto mais elevados quanto mais elevado for o parâmetro G_{IC} . De salientar também a curva que corresponde à diminuição do valor deste parâmetro que não pode ser considerada para efeitos de comparação visto que o valor demasiado baixo de G_{IC} não permitiu que a correta simulação desta condição.

Pela análise da Figura 130, que representa a influência do parâmetro G_{IIC} nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® AV138, conclui-se que este parâmetro não influencia rigidez do adesivo e provoca variações pouco significativas no valor de força máxima. Em relação ao deslocamento de rotura, o aumento do parâmetro G_{IIC} , provoca o seu aumento.

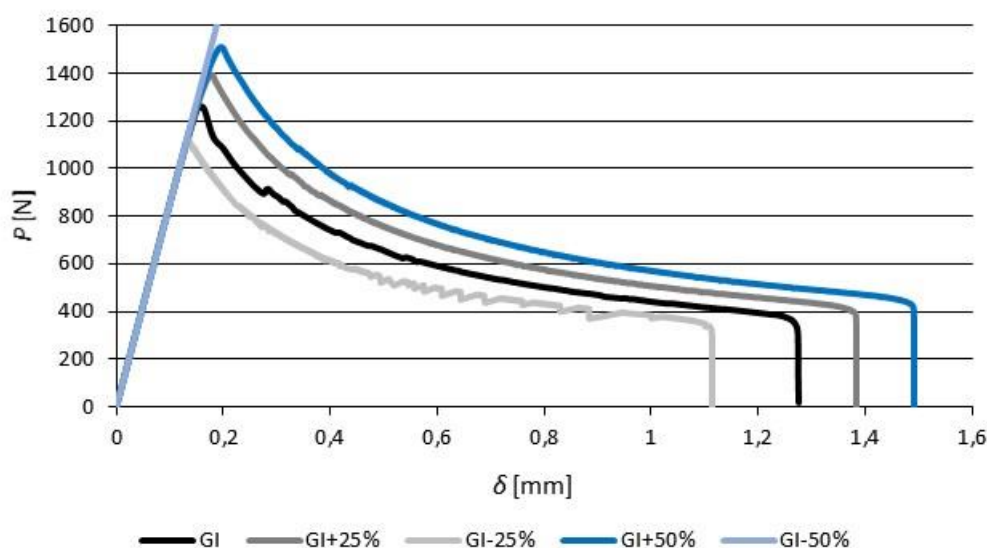


Figura 129 - Sensibilidade do adesivo Araldite® AV138 ao parâmetro G_{IC}

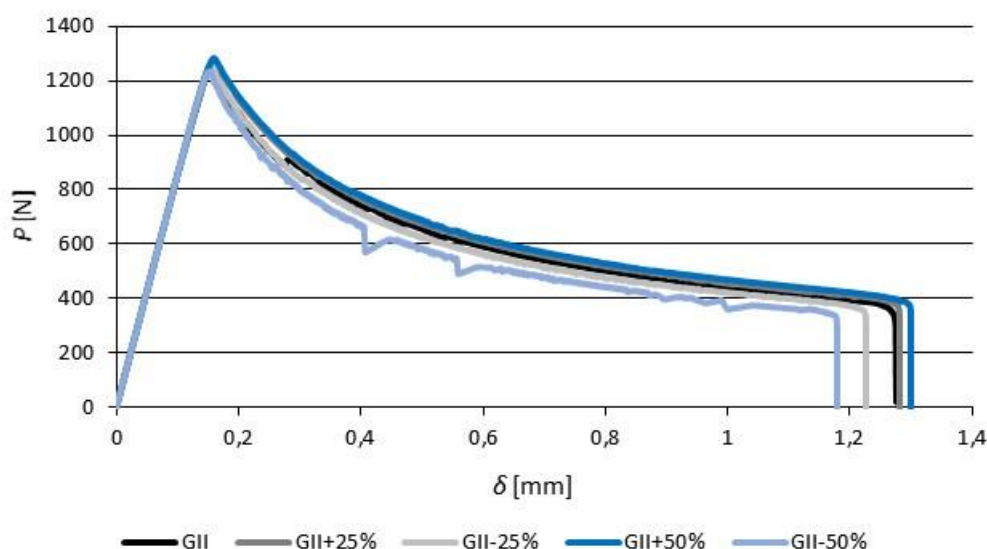


Figura 130 - Sensibilidade do adesivo Araldite® AV138 ao parâmetro G_{IIC}

Pela análise da Figura 131, que representa a influência dos parâmetros G_{IC} e G_{IIC} em combinação nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® AV138, observa-se que a combinação destes parâmetro combina a influência que cada um tem individualmente, sendo que não provoca alterações na rigidez do adesivo, o seu aumento provoca também o aumento do valor de força máxima sensivelmente da mesma ordem que o parâmetro G_{IC} provoca individualmente e, relativamente ao deslocamento de rotura, o aumento em combinação dos parâmetros G_{IC} e G_{IIC} aumento o deslocamento de rotura somando o aumento que cada parâmetro provoca individualmente.

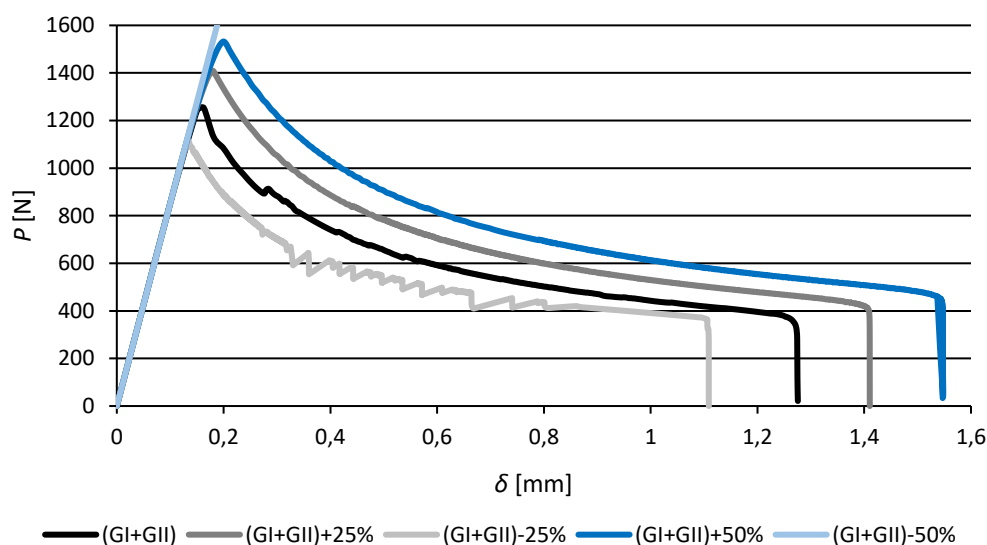


Figura 131 - Sensibilidade do Adesivo Araldite® AV138 aos parâmetros G_{IC} e G_{IIC} combinados

A análise da Figura 132, que representa a influência do parâmetro t_n^0 nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® AV138, permite concluir que este parâmetro não provoca alterações de rigidez no adesivo. Conclui-se também que a redução deste parâmetro provoca um ligeiro aumento do valor de deslocamento de rotura. Quanto ao valor força máxima a sua redução provoca a redução deste valor. De salientar que as curvas que representam as variações $t_n^0 + 25\%$ e $t_n^0 + 50\%$ não são consideradas para efeitos de comparação visto que não foi possível efetuar uma correta simulação destas condições.

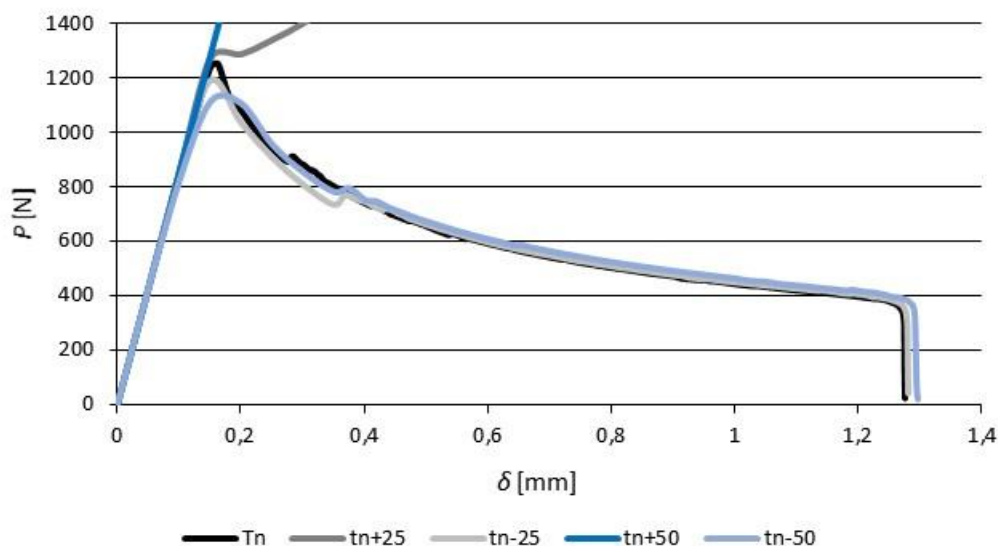


Figura 132 - Sensibilidade do Adesivo Araldite® AV138 ao parâmetro t_n^0

A análise da Figura 133, que representa a influência do parâmetro t_s^0 nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® AV138, leva a concluir que este parâmetro não tem influencia na

rigidez do adesivo, no deslocamento de rotura nem na força máxima que o adesivo atinge.

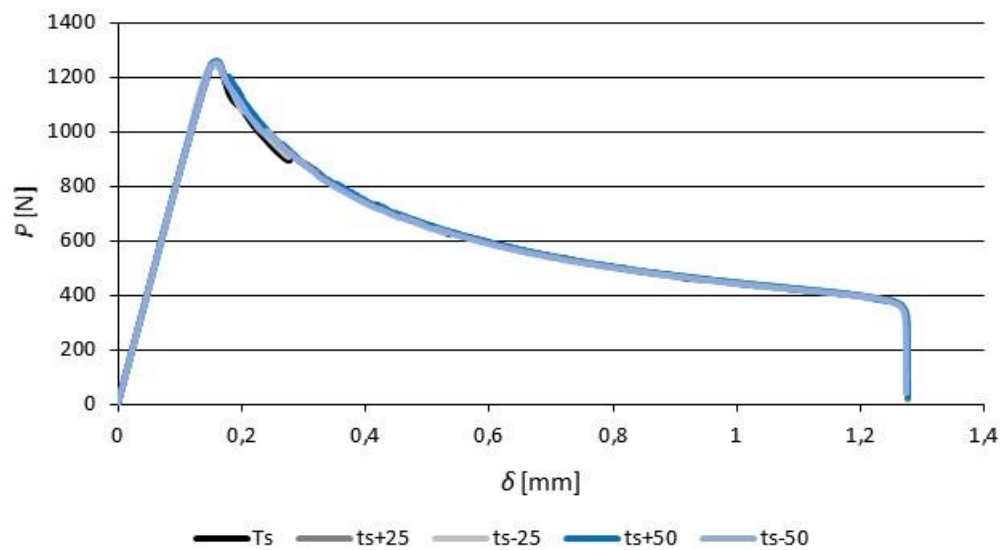


Figura 133 - Sensibilidade do Adesivo Araldite® AV138 ao parâmetro t_s^0

A análise da Figura 134, que representa a influência dos parâmetros t_n^0 e t_s^0 nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® AV138, permite observar que estes parâmetros em conjunto provocam variações idênticas ao do parâmetro t_n^0 provoca individualmente. Contudo, a variação $(t_n^0 + t_s^0) - 25\%$ tornou-se também impossível de simular corretamente.

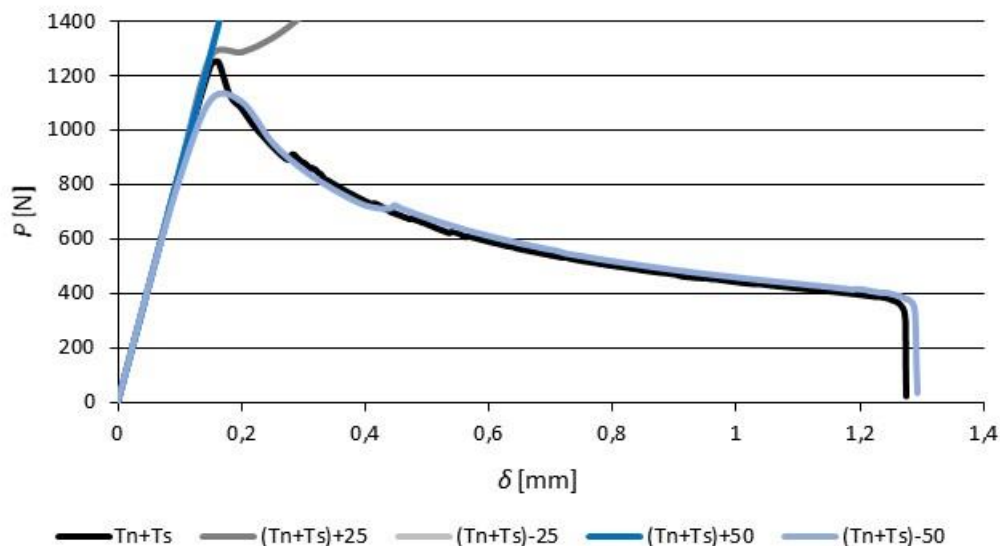


Figura 134 - Sensibilidade do adesivo Araldite® AV138 aos parâmetros t_n^0 e t_s^0 combinados

3.2.5.2 Araldite® 2015

É representada na Figura 135 a influência do parâmetro G_{IC} nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Pode-se concluir que este parâmetro não influencia a rigidez inicial do adesivo, visto todas as curvas apresentam o mesmo declive, contudo influencia consideravelmente o valor de força máxima e de deslocamento máximo que a junta atinge, sendo que estes valores aumentam com o aumento do parâmetro G_{IC} .

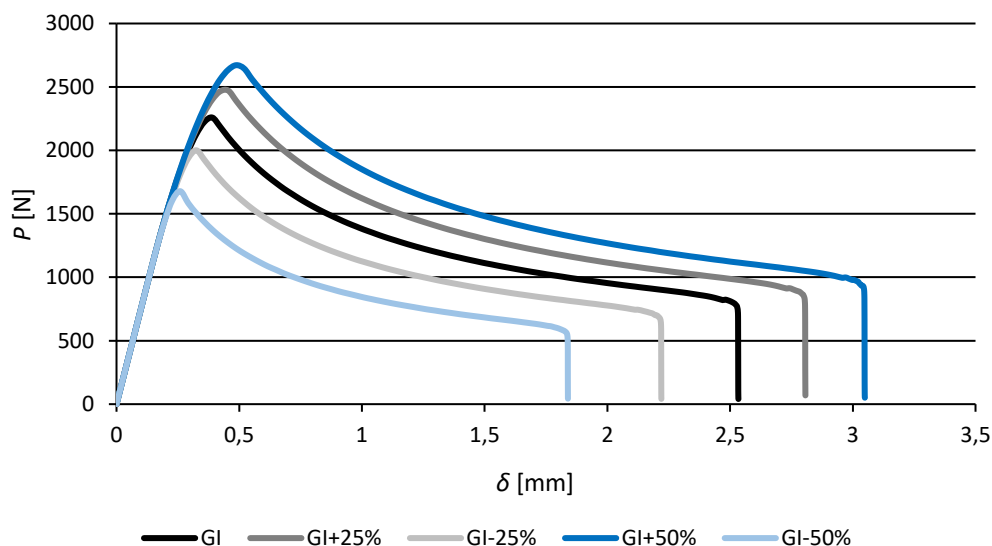


Figura 135 - Sensibilidade do Adesivo Araldite® 2015 ao parâmetro G_{IC}

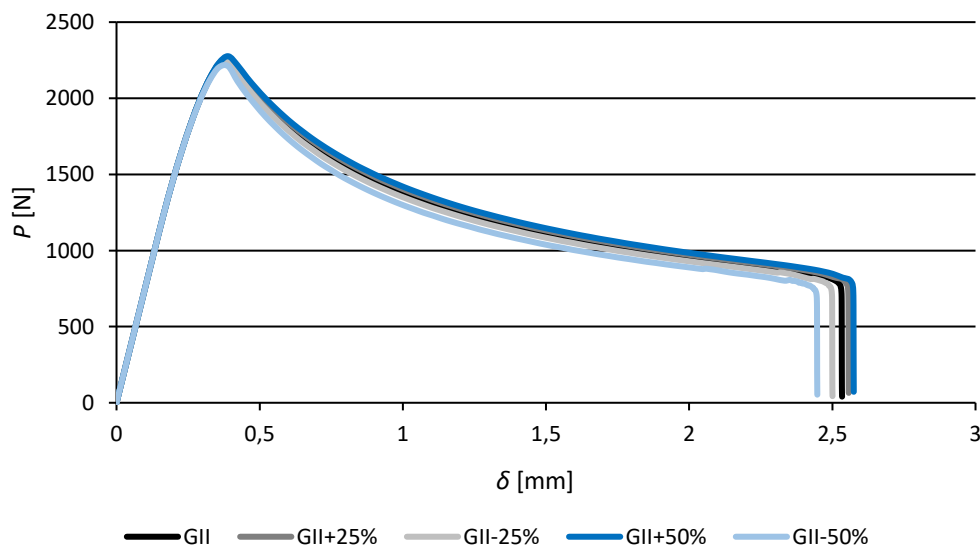


Figura 136 - Sensibilidade do Adesivo Araldite® 2015 ao parâmetro G_{IIc}

É representada na Figura 136 a influência do parâmetro G_{IIc} nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Pode-se concluir que este parâmetro tem pouca influencia no

desempenho do adesivo, sendo de notar ligeiros aumentos dos valores de força máxima e de deslocamento máximo com o aumento deste parâmetro.

É representada na Figura 137 a influência dos parâmetros G_{IC} e G_{IIC} em combinação nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Pode-se observar que as curvas mantêm a sua rigidez inicial e varia da mesma forma que já se tinha observado na análise da influência destes parâmetros individualmente, contudo, a variação é superior, sendo que é resultado da soma das variações que estes parâmetros provocam individualmente.

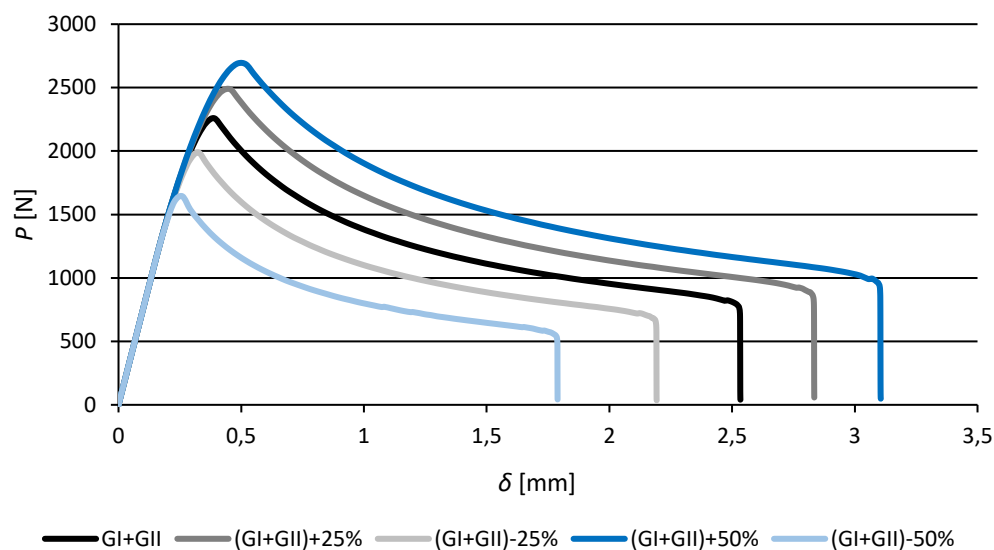


Figura 137 - Sensibilidade do Adesivo Araldite® 2015 aos parâmetros G_{IC} e G_{IIC} combinados

Está representada na Figura 138 a influência do parâmetro t_n^0 nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Pode-se observar que este parâmetro, ao contrário dos parâmetros G_{IC} e G_{IIC} , influencia a rigidez inicial do adesivo, sendo que quanto mais baixo for o valor deste parâmetro mais baixo é o declive inicial das curvas. Este parâmetro também influencia da mesma forma o valor de força máxima. Em relação ao deslocamento máximo, este parâmetro não tem influência.

Está representada na Figura 139 a influência do parâmetro t_s^0 nas curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Conclui-se que este parâmetro praticamente não influencia o desempenho do adesivo Araldite® 2015.

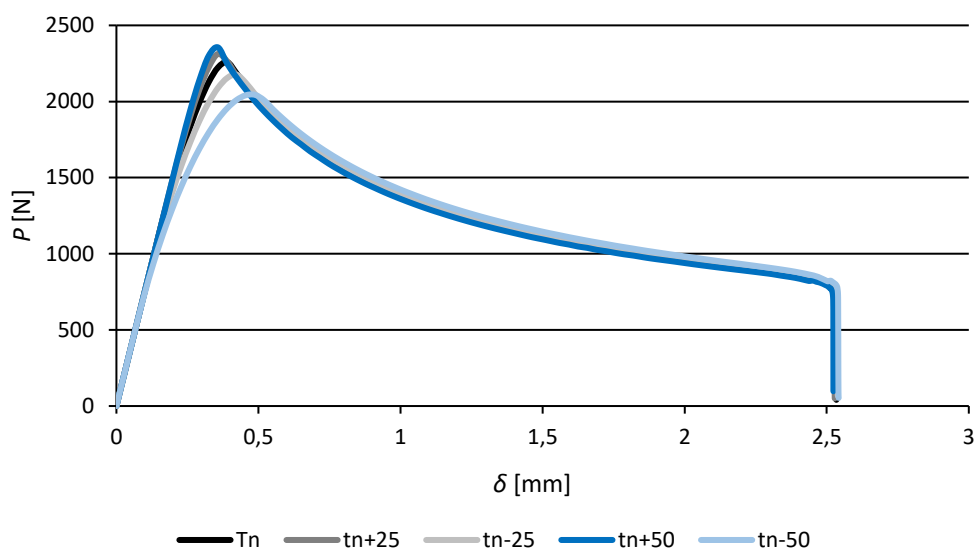


Figura 138 - Sensibilidade do Adesivo Araldite® 2015 ao parâmetro t_n^0

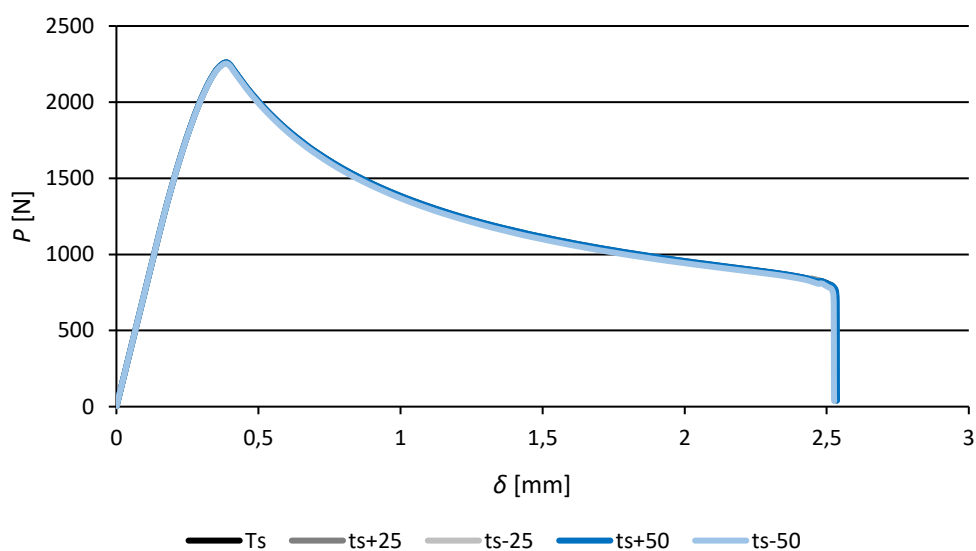


Figura 139 - Sensibilidade do adesivo Araldite® 2015 ao parâmetro t_s^0

Está representada na Figura 139 a influência dos parâmetros t_n^0 e t_s^0 em combinação nas curvas P - δ do adesivo Araldite® 2015. Visto que o parâmetro t_s^0 não influencia o desempenho do adesivo, as alterações provocadas pela combinação destes parâmetros são as mesmas que as provocadas pelo parâmetro t_n^0 individualmente.

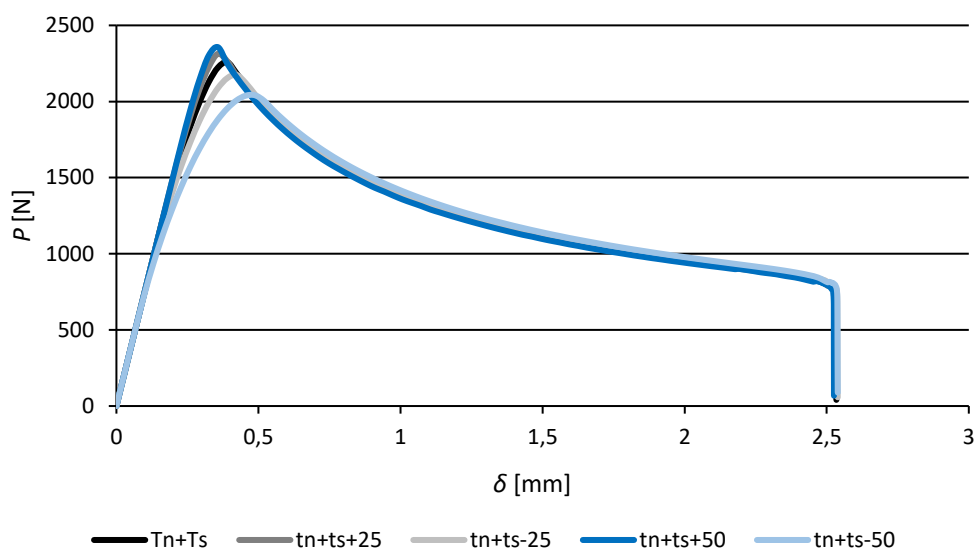


Figura 140 - Sensibilidade do adesivo Araldite® 2015 aos parâmetros t_n^0 e t_s^0 combinados

3.2.5.3 SikaForce® 7752

A Figura 141 representa a influência do parâmetro G_{IC} nas curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7752. Como as curvas apresentam o mesmo declive inicial conclui-se que este parâmetro não influencia a rigidez do adesivo. Em relação aos valores de força máxima e de deslocamento máximo, estes valores aumentam com o aumento do parâmetro G_{IC} .

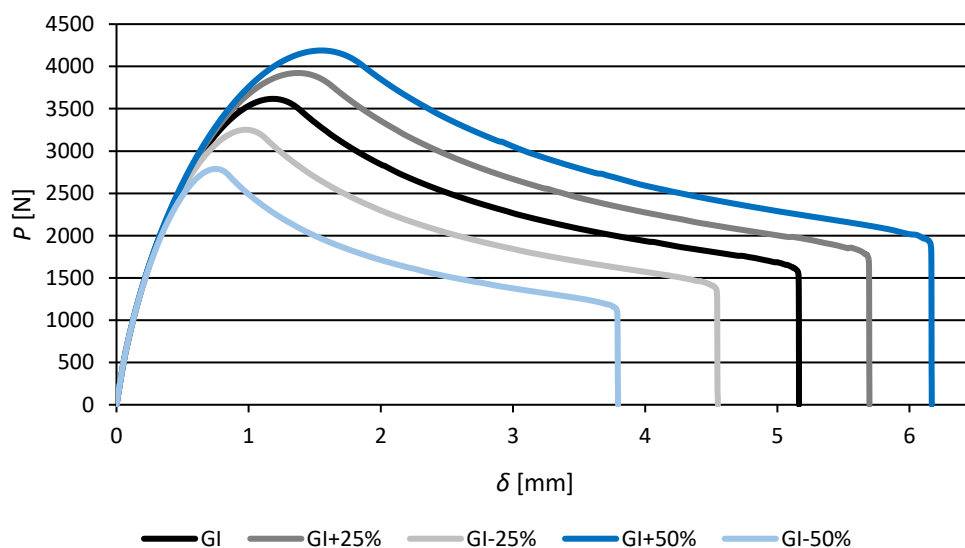


Figura 141 - Sensibilidade do adesivo SikaForce® 7752 ao parâmetro G_{IC}

A Figura 142 representa a influência do parâmetro G_{IIC} nas curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7752. Observa-se que este parâmetro também não influencia a rigidez do

adesivo. Também a variação de força máxima é quase nula. Relativamente ao deslocamento máximo, este sofre algum aumento com o aumento do parâmetro G_{IIC} .

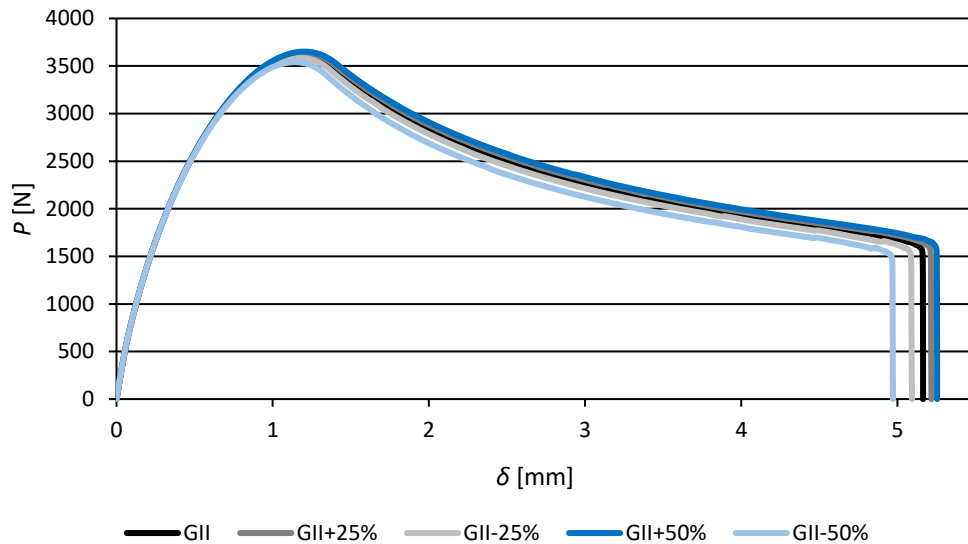


Figura 142 - Sensibilidade do adesivo SikaForce® 7752 ao parâmetro G_{IIC}

A Figura 143 representa a influência dos parâmetros G_{IC} e G_{IIC} em combinação nas curvas P - δ do adesivo SikaForce® 7752. A combinação destes parâmetros, como seria de esperar, também não influencia a rigidez do adesivo, faz variar os valores de força máxima de forma igual à registada com a variação do parâmetro G_{IC} e soma as variações dos valores de deslocamento máximos de ambos os parâmetros.

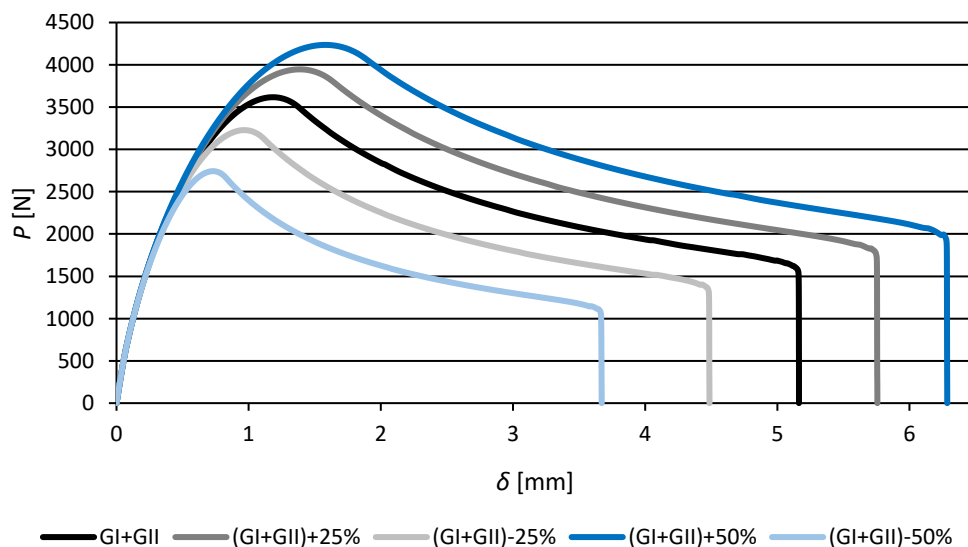


Figura 143 - Sensibilidade do adesivo SikaForce® 7752 aos parâmetros G_{IC} e G_{IIC} combinados

A Figura 144 representa a influência do parâmetro t_n^0 nas curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7752. Conclui-se que este parâmetro influencia consideravelmente a rigidez e o valor máximo de força do adesivo. Sendo que quanto mais elevado for este parâmetro mais elevada é a rigidez do adesivo e respetiva resistência. Relativamente ao valor de deslocamento máximo, este parâmetro apenas influencia este valor quando reduzido a metade.

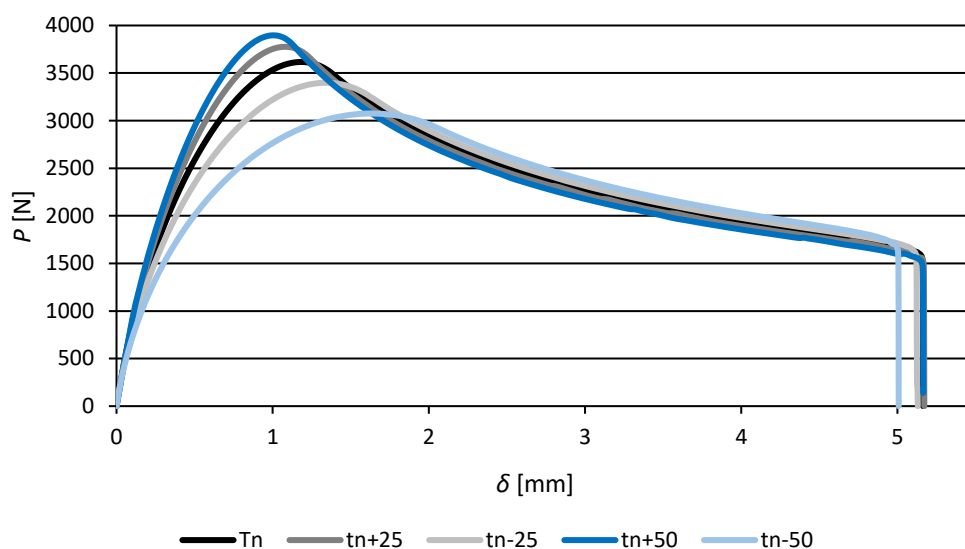


Figura 144 - Sensibilidade do adesivo SikaForce® 7752 ao parâmetro t_n^0

A Figura 145 representa a influência do parâmetro t_s^0 nas curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7752. Observa-se que este parâmetro praticamente não tem influência no desempenho do adesivo SikaForce® 7752.

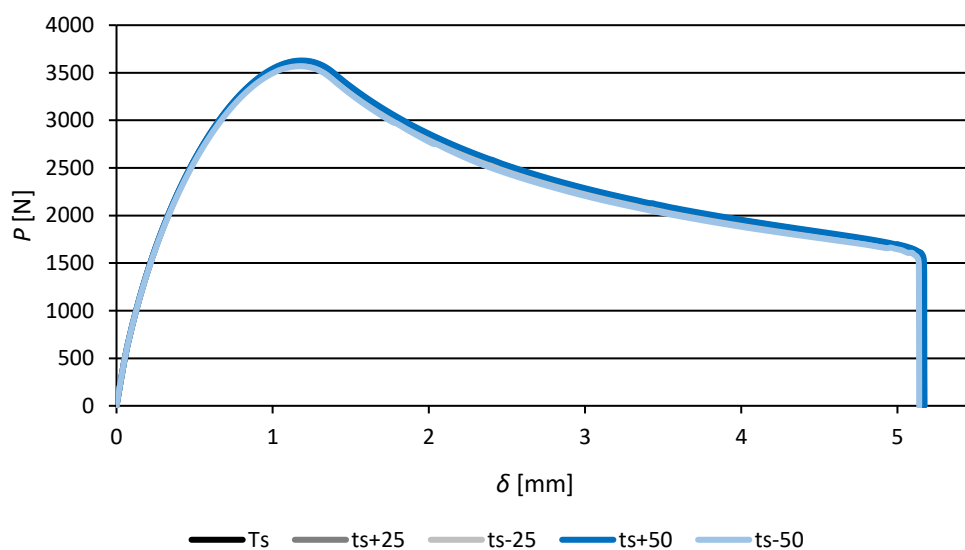


Figura 145 - Sensibilidade do adesivo SikaForce® 7752 ao parâmetro t_s^0

A Figura 146 representa a influência dos parâmetros t_n^0 e t_s^0 em combinação nas curvas P - δ do adesivo SikaForce® 7752. Como o parâmetro t_s^0 não influencia o comportamento do adesivo, as alterações nas curvas são idênticas às observadas com a alteração do parâmetro t_n^0 de forma individual.

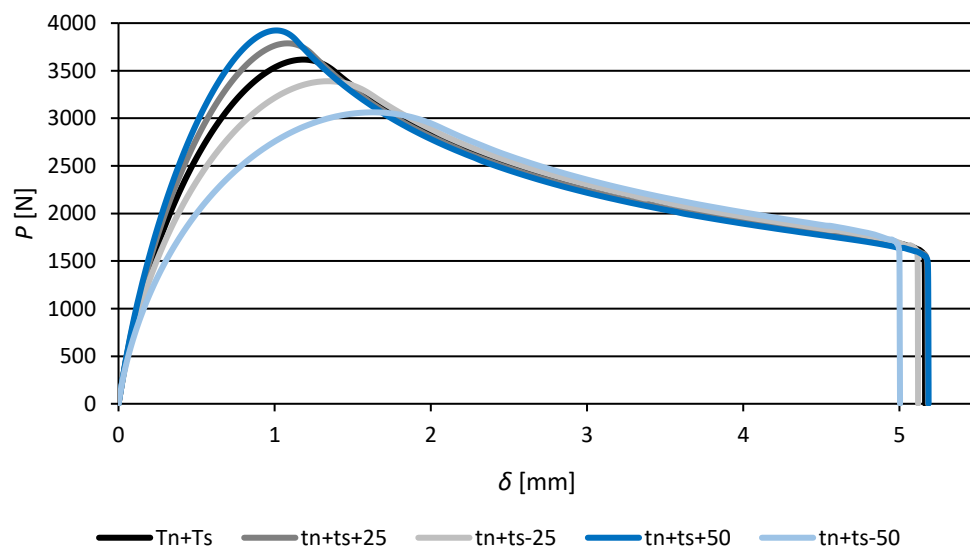


Figura 146 - Sensibilidade do adesivo SikaForce® 7752 aos parâmetros t_n^0 e t_s^0 combinados

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Os provetes usados nos ensaios experimentais apresentaram poucos defeitos e apresentaram resultados com uma boa repetibilidade, o que permite concluir que os provetes foram bem preparados e os ensaios experimentais foram corretamente realizados. Os resultados experimentais permitiram também obter curvas- R com patamares identificáveis, o que permitiu obter os pontos necessário para a construção dos envelopes de fratura de cada adesivo. Os valores de G , G_I e G_{II} refletiram de forma correta a diferença de ductilidade dos adesivos utilizados, foram superiores no adesivo SikaForce® 7752 e inferiores no adesivo Araldite® AV138. A baixa dispersão de valores de G_I e G_{II} , principalmente nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 e um pouco superior, mas pouco significativa no adesivo SikaForce® 7752, permitiu posicionar os pontos no envelope de fratura numa determinada zona que permitiu a identificação do critério de propagação em modo misto adequado para cada adesivo. Os pontos nos três adesivos ficaram posicionados de forma clara perto da curva representativa do critério de propagação em modo misto $\frac{1}{2}$ identificando este critério como o adequado para a descrição do comportamento em modo misto dos adesivos.

Os ensaios numéricos reproduziram com grande proximidade as curvas P - δ dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, isto permitiu concluir que o modelo de dano coesivo triangular foi bem escolhido para descrição do comportamento do adesivo durante a propagação da fenda. As curvas- R também foram também corretamente reproduzidas e os valores de G , G_I e G_{II} foram bastante próximos dos obtidos experimentalmente o que permitiu posicionar os pontos de forma idêntica, e assim construir um envelope de fratura idêntico ao envelope de fratura experimental o que permitiu validar o critério de propagação em modo misto $\frac{1}{2}$ como o mais adequado para descrever o comportamento em modo misto destes adesivos. Assim, para o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, foi atingido o objetivo de identificar o modelo de dano coesivo e o critério de propagação em modo misto mais adequado para prever o comportamento destes adesivos.

Os ensaios numéricos com o adesivo SikaForce® 7752 não conseguiram reproduzir corretamente as curvas P - δ experimentais, apresentando uma rigidez inferior, considera-se que esta diferença ocorre porque foi utilizada uma lei coesiva triangular, que assume o amaciamento de tensões imediatamente após a iniciação do dano (perda de linearidade entre tensão e deslocamento), quando na realidade, para este adesivo se observa idealmente um patamar de tensões de extensão significativa o que depois

reflete-se na zona de propagação da fenda. Isto permite concluir que o modelo de dano coesivo triangular não é o adequado para descrever o comportamento do adesivo SikaForce® 7752 e que um modelo de dano coesivo trapezoidal provavelmente seria mais adequado para descrição do comportamento mais dúctil deste adesivo uma vez, que não assume o amaciamento de tensões após a iniciação do dano e confere um patamar de tensões idêntico ao que este adesivo exhibe na realidade. Este erro na descrição do comportamento do adesivo teve como consequência que as curvas- R registadas numericamente não reproduzissem corretamente as curvas- R experimentais e assim os valores de G , G_I e G_{II} obtidos foram bastante superiores aos obtidos experimentalmente. Este facto levou a que o posicionamento dos pontos no envelope de fratura se alterasse e a maior proximidade a curva representativa do critério de propagação em modo misto 1 invalidou o critério $\frac{1}{2}$ como o mais adequado à descrição do comportamento em modo misto do adesivo SikaForce® 7752.

No adesivo SikaForce® 7752 não foi possível identificar o modelo de dano coesivo e o critério de propagação em modo misto mais adequado para o adesivo.

A análise de sensibilidade aos parâmetros G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 permitiu concluir que estes parâmetros influenciam aproximadamente da mesma maneira os três adesivos. O aumento do parâmetro G_{IC} provocou um aumento significativo dos valores de força máxima e de deslocamento de rotura, o aumento do parâmetro G_{IIC} provocou um ligeiro aumento do valor de deslocamento de rotura, o aumento do parâmetro t_n^0 provocou um ligeiro aumento do valor de carga máxima enquanto que a variação de t_s^0 não teve influencia no comportamento dos adesivos. A combinação de variações de parâmetros provocou variações idênticas a soma das variações dos parâmetros individualmente.

É sugerida para trabalhos futuros a realização de simulações numéricas com um modelo de dano coesivo trapezoidal para aferir se descrever de forma mais exata o comportamento do adesivo e se o critério de propagação em modo misto $\frac{1}{2}$ é validado. Outra sugestão para trabalhos futuros é o desenvolvimento de mais formas de cálculo de G para o ensaio ATDCB, de forma idêntica a outros ensaios, de forma a se poder realizar estudos mais rigorosos. Também é sugerido realizar-se um estudo da influência dos parâmetros G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 na lei coesiva.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. McGraw-Hill. ISBN: 0-07-049888-1.
2. da Silva, L.F.M., A. Oschner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion and Technology*. 2011: Springer Heidelberg. 1543. ISBN: 978-3-642-01168-9.
3. Esteves, J.L.S., *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*. 2012.
4. *SURFACES, CHEMISTRY AND APPLICATIONS. ADHESION SCIENCE AND ENGINEERING*, ed. A.V. Pocius. Vol. 2. 2002: ELSEVIER. ISBN: 0 444 5 1140 7.
5. *Automotive Realizing Vision*, Sika, Editor. 2017: Headquarters Sika.
6. *Rail Leading Innovation in a Dynamic Industry*, Sika, Editor. 2017.
7. *THE MECHANICS OF ADHESION. ADHESION SCIENCE AND ENGINEERING*, ed. A.V. Pocius. Vol. 1. 2002: Elsevier. ISBN: 0 444 51 140 7.
8. Da Silva, L.F. and R. Adams, *Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(3): p. 227-235.
9. Da Silva, L.F. and R. Adams, *Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(3): p. 216-226.
10. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2012.
11. Radice, J. and J. Vinson, *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. Composites science and technology, 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
12. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media. ISBN: 0412709201.
13. Adams, R. and J. Comyn, *Joining using adhesives*. Assembly Automation, 2000. **20**(2): p. 109-117.
14. Czarnocki, P. and K. Piekarski, *Fracture strength of an adhesive-bonded joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1986. **6**(2): p. 93-95.
15. Hu, F. and C. Soutis, *Strength prediction of patch-repaired CFRP laminates loaded in compression*. Composites Science and Technology, 2000. **60**(7): p. 1103-1114.
16. Gonzalez Murillo, C., et al. *Experimental and finite element studies of adhesively bonded lap joints for natural fibre composites*. in *Proceedings of the 16th international conference on composite materials*. Kyoto, Japan. 2007.
17. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2012.

18. Vallée, T., J.R. Correia, and T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles–Part II: Strength prediction*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(13): p. 1915-1930.
19. Gonçalves, J.P.M., *Contribuições para a análise numérica e experimental do comportamento de juntas de sobreposição simples*. 2012.
20. Goncalves, J., M. De Moura, and P. De Castro, *A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(5): p. 357-365.
21. Banea, M.D. and L.F.M.d. Silva, *Adhesively bonded joints in composite materials: An overview*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2009. **223**(1): p. 1-18.
22. Pinto, A.M.G., et al., *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
23. da Silva, L.F.M., et al., *Testing Adhesive Joints*. 2012: Wiley-VCH Verlag & Co. 440. ISBN: 978-3-527-32904-5.
24. Dvorak, G.J., J. Zhang, and O. Canyurt, *Adhesive tongue-and-groove joints for thick composite laminates*. Composites science and technology, 2001. **61**(8): p. 1123-1142.
25. Oterkus, E., et al., *Bonded lap joints of composite laminates with tapered edges*. International journal of solids and structures, 2006. **43**(6): p. 1459-1489.
26. Quaresimin, M. and M. Ricotta, *Stress intensity factors and strain energy release rates in single lap bonded joints in composite materials*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(5): p. 647-656.
27. Sheppard, A., D. Kelly, and L. Tong, *A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 1998. **18**(6): p. 385-400.
28. Objois, A., J. Assih, and J. Troalen, *Theoretical method to predict the first microcracks in a scarf joint*. The Journal of Adhesion, 2005. **81**(9): p. 893-909.
29. Objois, A., B. Fargette, and Y. Gilibert, *The influence of the bevel angle on the micro-mechanical behaviour of bonded scarf joints*. Journal of adhesion science and technology, 2000. **14**(8): p. 1057-1070.
30. Odi, R.A. and C.M. Friend, *A comparative study of finite element models for the bonded repair of composite structures*. Journal of reinforced plastics and composites, 2002. **21**(4): p. 311-332.
31. Tzetzis, D. and P. Hogg, *Experimental and finite element analysis on the performance of vacuum-assisted resin infused single scarf repairs*. Materials & Design, 2008. **29**(2): p. 436-449.
32. Her, S.-C., *Stress analysis of adhesively-bonded lap joints*. Composite structures, 1999. **47**(1): p. 673-678.
33. Yeh, H.-Y. and D. Tandjung, *Mixed mode fracture analysis of the lap shear specimen test per ASTM D1002*. Journal of reinforced plastics and composites, 2005. **24**(8): p. 839-853.
34. da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media. ISBN: 3642011683.
35. Adams, R.D., *Adhesive bonding Science, technology and applications*. 2005: Woodhead Publishing Limited,. ISBN: 1 85573 741 8.

36. Skeist, I., *Handbook of adhesives*. 2012: Springer Science & Business Media. ISBN: 146130671X.
37. Da Silva, L.F., et al., *Testing adhesive joints: best practices*. 2012: John Wiley & Sons. ISBN: 352764704X.
38. Li, Y., J. Electrochem. Soc., 2012.
39. Finot, M. and S. Suresh, *Small and large deformation of thick and thin-film multi-layers: effects of layer geometry, plasticity and compositional gradients*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1996. **44**(5): p. 683-721.
40. Freund, L., J. Floro, and E. Chason, *Extensions of the Stoney formula for substrate curvature to configurations with thin substrates or large deformations*. Applied Physics Letters, 1999. **74**(14): p. 1987-1989.
41. Liechti, K. and Y. Liang, *Influence of Specimen Geometry on Interfacial Fracture Resistance measurements*. ASME, Atlanta, GA, USA, 1991: p. 1-8.
42. Liechti, K. and Y.-M. Liang, *The interfacial fracture characteristics of bimaterial and sandwich blister specimens*. International Journal of Fracture, 1992. **55**(2): p. 95-114.
43. O'Brien, E., S. Case, and T. Ward, *Critical and subcritical adhesion measurements of a model epoxy coating exposed to moisture using the shaft-loaded blister test*. The Journal of Adhesion, 2005. **81**(1): p. 41-58.
44. Chaves, F.J.P., et al., *Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(12): p. 955-992.
45. Im, W. and D. Hadley, *Mechanical Properties of Solid Polymers*. Wiley, Chichester, 1983.
46. Roark, R. and W. Young, 1989, *Roark's Formulas for Stress and Strain*, McGraw-Hill, NY.
47. *Fatigue and fracture of adhesively-bonded composite joints: Behaviour, simulation and modelling*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Vol. 52. 2015: Woodhead Publishing. ISBN: 978-0-85709-806-1.
48. Fernández, M.V., et al., *Mixed-mode I+II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-Leg Bending test*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013. **44**: p. 63-69.
49. Islam, M.M., *Evaluation of Adhesive Joints for Combined Load Test-Fixtures*. Journal of Mechanics Engineering and Automation, 2013.
50. Chaves, F.J., et al. *Determination of the Envelopes for Mode-Mixity Evaluation of Adhesively Bonded Steel*. in *Iberian Conference on Fracture and Structural Integrity 2010*. 2010.
51. Da Silva, L., V. Esteves, and F. Chaves, *Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2011. **42**(5): p. 460-470.
53. Khoshravan, M. and F. Asgari Mehrabadi, *Fracture analysis in adhesive composite material/aluminum joints under mode-I loading; experimental and numerical approaches*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **39**: p. 8-14.
54. De Moura, M., R. Campilho, and J. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10): p. 2224-2230.

55. Ribeiro, P., et al., *ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO ENSAIO DCB APLICADO À MADEIRA DE PINUS PINASTER AIT*.
56. Biel, A. and U. Stigh, *Effects of constitutive parameters on the accuracy of measured fracture energy using the DCB-specimen*. Engineering Fracture Mechanics, 2008. **75**(10): p. 2968-2983.
57. Campilho, R., et al., *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. Composites Part B: Engineering, 2013. **50**: p. 120-126.
58. Park, S. and D.A. Dillard, *Development of a simple mixed-mode fracture test and the resulting fracture energy envelope for an adhesive bond*. International Journal of Fracture, 2007. **148**(3): p. 261-271.
59. Feraren, P. and H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(15): p. 2125-2142.
60. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012, Heidelberg: Springer
61. Campilho, R., *Chapter 6. Cohesive Zone Modelling for Static Applications, in Strength Prediction of Adhesively-Bonded Joints*. 2016, CRC Press. p. 122-160. ISBN: 978-1-4987-2246-9.
62. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
63. Campilho, R.D.S.G., et al., *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 678-686.
64. Pardoen, T., et al., *Constraint effects in adhesive joint fracture*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005. **53**(9): p. 1951-1983.
65. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
66. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
67. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
68. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
69. Xie, D. and A.M. Waas, *Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(13): p. 1783-1796.
70. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International journal for numerical methods in engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.

71. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
72. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
73. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
74. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adhesively Bonded Repair Proposal for Wood Members Damaged by Horizontal Shear Using Carbon-Epoxy Patches*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(5-6): p. 649-670.
75. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
76. Alfano, G., *On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(6): p. 723-730.
77. Xie, D., et al., *Discrete Cohesive Zone Model to Simulate Static Fracture in 2D Triaxially Braided Carbon Fiber Composites*. Journal of Composite Materials, 2006. **40**(22): p. 2025-2046.
78. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
79. Lee, M.J., et al., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
80. Li, S., et al., *Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer-matrix composite*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(3-4): p. 537-549.
81. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, and J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
82. Banea, M.D., L.F.M. da Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Temperature Dependence of the Fracture Toughness of Adhesively Bonded Joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010. **24**(11-12): p. 2011-2026.
83. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
84. Pandya, K.C. and J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
85. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
86. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009, Universidade do Porto (Portugal).
87. Blackman, B., A. Kinloch, and M. Paraschi, *The determination of the mode II adhesive fracture resistance, G_{IIC} , of structural adhesive joints: an effective crack length approach*. Engineering Fracture Mechanics, 2005. **72**(6): p. 877-897.

88. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
89. Yang, Q. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
90. Yang, Q., M. Thouless, and S. Ward, *Numerical simulations of adhesively-bonded beams failing with extensive plastic deformation*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1999. **47**(6): p. 1337-1353.
91. Yang, Q., M. Thouless, and S. Ward, *Elastic-plastic mode-II fracture of adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures, 2001. **38**(18): p. 3251-3262.
92. Kafkalidis, M. and M. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
93. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
94. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, and J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
95. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **88**: p. 513-533.
96. Campilho, R., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
97. Neto, J., R.D. Campilho, and L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
98. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014.
99. Fernandes, T.A., et al., *Adhesive selection for single lap bonded joints: experimentation and advanced techniques for strength prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
100. Lopes, R.M., *Comparação dos ensaios DCB e TDCB para determinação da tenacidade em tração de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
101. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
102. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais*. 2014, Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
103. Santos, M., International Journal of Fracture, 2017.
104. Liljedahl, C., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International journal of fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.

105. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.